

***Caracterización Textural y Composicional de Sedimentos en Suspensión en
Bocas de Ceniza, Desembocadura del Río Magdalena, Costa Caribe de
Colombia***

Estefany Paola Villanueva García

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias – Universidad del Norte



Universidad del Norte, Barranquilla

Junio de 2020

***Caracterización Textural y Composicional de Sedimentos en Suspensión en
Bocas de Ceniza, Desembocadura del Río Magdalena, Costa Caribe de
Colombia***

Estefany Paola Villanueva García

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias – Universidad del Norte

*Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Geólogo*

Director

PhD. Juan Camilo Restrepo López

Departamento de Física y Geociencias

Universidad del Norte



Universidad del Norte, Barranquilla
Junio de 2020

Dedicatoria

Dedicado a la memoria de Manuel Antonio García Arévalo.

Quien entregó todo sin esperar nada a cambio.

Agradecimientos

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) por la financiación en el marco del proyecto “Hacia el entendimiento de la turbulencia y la floculación en desembocaduras tropicales – Procesos fundamentales en la formación de zonas de máxima turbidez y el transporte de sedimentos”.

A mi director Juan Camilo Restrepo López por su paciencia, su confianza y su apoyo académico y emocional durante todo mi proceso de formación profesional. Le agradezco por ser una fuente constante de motivación y aliento.

A los profesores Felipe Lamus Ochoa y Juan Carlos Molano Mendoza por su colaboración y apoyo constante en los análisis de las muestras para la realización de este proyecto.

A la planta de profesores del departamento de Física y Geociencias de la Universidad del Norte, especialmente a Carolina Martínez Mendoza y Luis José Otero Díaz, por sus enseñanzas y consejos a lo largo de la carrera.

A todos mis amigos y colegas por su compañía, sus consejos y su apoyo.

A mi familia, por su compañía constante y apoyo incondicional. Sabiendo que jamás encontraré forma de agradecerles, esperando que comprendan que mis ideales y logros han sido también suyos e inspirados en ellos.

Resumen

Esta investigación se centró en la caracterización de las propiedades texturales y composicionales de los sedimentos en suspensión en sistemas estuarinos, para evidenciar el proceso de floculación en la zona de máxima turbidez de la desembocadura del río Magdalena. Se realizaron mediciones in situ de la concentración y distribución de tamaño del sedimento suspendido. Se recolectaron muestras de agua para ser filtradas y obtener los sedimentos en suspensión con los que se realizaron secciones delgadas. El análisis de las secciones delgadas se realiza en un microscopio petrográfico, la plataforma de escaneo Metasystem y la espectroscopía de Raman. Los datos de distribución de tamaño se procesaron en el software GRADISTAT, dando como resultado un sistema dominado por la fracción fina en la capa superficial y media. Mientras que en la capa de fondo se observa una distribución bimodal durante las bajamareas y una tendencia a la fracción gruesa durante las pleamareas. Las imágenes microscópicas permiten identificar que las partículas en los rangos de tamaño de arena son resultado de la floculación, y con esto se deduce que los sedimentos identificados in-situ por el LISST-200X en el rango de tamaño de arena corresponden a flóculos o aglomeraciones de partículas cohesivas. Debido a resultados similares a los obtenidos por el LISST-200X, la mayoría de los modelos aplicados en la zona han utilizado erróneamente aproximaciones basadas en sedimentos no cohesivos. Se debe generar un cambio en estos modelos que considere la alteración de la floculación y las propiedades de las partículas cohesivas.

Abstract

This research was focus on characterizing the textural and compositional properties of suspended sediments in estuarine systems to demonstrate the flocculation process in the zone of maximum turbidity at the mouth of the Magdalena River. In situ measurements of the concentration and size distribution of the suspended sediment were made. Water samples were collected to be filtered and to obtain the suspended sediments that was used to make thin sections. Analysis of the thin sections is performed under a petrographic microscope, the Metasystem scanning platform, and Raman spectroscopy. The size distribution data was processed in the GRADISTAT software, resulting in a system dominated by the fine fraction in the surface and middle layer. While in the bottom layer a bimodal distribution is observed during low tides and a tendency to coarse fraction during high tides. Microscopic images make it possible to identify that the particles in the sand size ranges are the result of flocculation, and with this it follows that the sediments identified in-situ by the LISST-200X in the sand size range correspond to flocs or agglomerations of cohesive particles. Due to results like those obtained by the LISST-200X, most of the models applied in the area have erroneously used approaches based on non-cohesive sediments. A change must be generated in these models that considers the alteration of flocculation and the properties of cohesive particles.

Tabla de Contenido

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema.....	4
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Metodología	5
4.1. Área de estudio	5
4.2. Recolección de datos y muestras: salida de campo	8
4.3. Procesamiento de datos	8
4.4. Procesamiento de las muestras	10
4.5. Análisis de las muestras: Petrografía, Metasystem y Raman.	11
5. Resultados	13
5.1. Distribución de tamaño de partículas	13
5.2. Concentración de sedimentos	16
5.3. Análisis microscópico de las partículas.....	17
5.3.1. Fotografías de las partículas en las secciones delgadas	17
5.3.2. Distribución composicional de las partículas.....	20
5.4. Distribución mineralógica – Espectroscopía de Raman	21
6. Análisis de resultados	23
6.1. Distribución de tamaño de las partículas	23
6.2. Concentración de sedimentos en suspensión.....	24
6.3. Distribución composicional de las partículas	25
6.4. Floculación	26
7. Conclusiones	27
Referencias.....	29
Apéndice A. Distribución de tamaños del LISST-200X	35
Apéndice B. Espectros de Raman.....	36
Apéndice C. Fotografías de minerales, a través de espectroscopía de Raman.	40
Apéndice D. Parámetros estuarinos	42
Apéndice E. % Materia orgánica	43

Lista de Tablas

Tabla 1. Escala de distribución tamaño de Udden (1914) and Wentworth (1922) modificada y adaptada en el software GRADISTAT	9
Tabla 2. Indicadores de clasificación. Tomado de: Folk y Ward, 1957	10
Tabla 3. Propiedades ópticas de las partículas	21
Tabla 4. Distribución mineralógica.....	23

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del sitio de medición.....	6
Figura 2. Parámetros estadísticos mediante el método de Folk y Ward (1957): A) Tamaño medio (AF - Arenas finas; AMF- Arenas muy finas; LG - Limos gruesos; LM - Limos medios y LF - Limos finos), B) Selección (PC - Pobremente clasificado y MPC - Muy pobremente clasificado), C) Gráfico de forzadores: Marea (línea naranja), Caudal (línea negra) y Parámetro de estratificación (línea azul), D) Perfiles verticales de tamaño medio, E) Perfiles verticales de selección.....	14
Figura 3. Distribución de tamaño: LISST-200X (GRADISTAT) y Conteo.....	15
Figura 4. Volumen de concentración a lo largo del tiempo de medición en toda la columna de agua.	17
Figura 5. Fotografías de los sedimentos en microscopio petrográfico, con objetivos 10X y 20X, en luz transmitida plana (columna izquierda) y luz polarizada cruzada (columna derecha): A) Superficie, B) Medio, C) Fondo, D) Aglomerado de partículas (Flóculo).	18
Figura 6. Fotografías de los sedimentos en microscopio motorizado: A) Superficie, B) Medio, C) Fondo.	19
Figura 7. Distribución composicional de los sedimentos en la columna de agua	20
Figura 8. Fotografías de cristales, a través de espectroscopía de Raman.	22
Figura 9. Resultados de la espectroscopia de Raman (rojo) y espectros estándar de RRUFF Project (azul). A) Espectro estándar Brookita; B) Espectro estándar de Cuarzo.....	22

1. Introducción

La erosión, suspensión, sedimentación, y resuspensión son algunos de los principales procesos que ocurren durante el transporte de sedimentos. En ambientes estuarinos los sedimentos en el rango de tamaño de arcilla y limo forman agregados de mayor tamaño, denominados flocs o flóculos, como resultado del proceso de floculación (Ospino, 2019). Los flóculos son estructuras heterogéneas compuestas por un componente de biota y biorgánico, partículas inorgánicas, poros y agua (Droppo et al., 2001).

El componente de biota y biorgánico se refiere principalmente a la comunidad microbiana, pero también se puede referir a componentes orgánicos derivados del metabolismo microbiano (e.g. sustancias poliméricas extracelulares -EPS), a la descomposición orgánica general (e.g. detritos) y a cualquier organismo de mayor tamaño (e.g. algas y diatomeas). Las partículas inorgánicas, también denominadas partículas primarias constitutivas, se refieren a cualquier tipo de partícula mineral (e.g. arcilla y limo) o estructura química precipitada (nódulos) que presente doble capa electroquímica y pueda ser influenciado por las fuerzas de Van der Waals. Los poros son los espacios vacíos o canales que se desarrollan dentro del flóculo y el agua puede estar retenida dentro del *floc* o fluyendo a través de los poros (Droppo et al., 2001).

Los flocs pueden clasificarse en tres tipos, de acuerdo con su composición y tamaño. Los flocs de orden cero están conformados por las partículas inorgánicas. La combinación de estas partículas con la materia orgánica forma los flocs de bajo orden o micro-flocs, los cuales tienen formas irregulares y soportan fuerzas de desagregación (Manning et al., 2006). Finalmente, los macro- flocs o flocs de orden mayor tienen un mayor tamaño, son más densos y consistentes y presentan formas irregulares, aunque en algunos casos son redondeados o elongados (Eisma, 1986).

La floculación consiste en la aglomeración de partículas en el rango de tamaño de arcilla y limo, debido a su cohesividad y a condiciones específicas en el entorno como las características fisicoquímicas del fluido (pH), la interacción con elementos orgánicos, la tasa e intensidad de las colisiones generadas principalmente por la turbulencia y la interacción del material particulado en suspensión (MPS) con elementos orgánicos (Partheniades, 2009). Las variaciones en la turbulencia y en los componentes biológicos pueden alterar las propiedades de los flocs (Van Leussen, 1998).

La floculación altera las características texturales del MPS, y por lo tanto afecta su velocidad de sedimentación, la magnitud de los flujos depositacionales y la capacidad de un estuario para retener sedimento (Partheniades, 2009). Las agregaciones generan una densidad en los flocs mayor a la de las partículas primarias constitutivas, por lo que aumenta su velocidad de sedimentación. Por lo tanto, la determinación de la composición y textura de las partículas inorgánicas es un factor esencial en la caracterización de los flocs y la comprensión de sus efectos en los procesos de transporte y deposición de sedimentos (Braithwaite et al., 2010; Winterwerp, 2011).

En Colombia, el conocimiento de las propiedades mineralógicas y texturales de los sedimentos en suspensión, así como el entendimiento de los procesos de sedimentación en zonas deltaicas son incipientes. Se destacan trabajos como la cuantificación del transporte de sedimentos en los principales sistemas fluviales del país (Restrepo y Kjerfve, 2004), la construcción de modelos de evolución morfodinámica en los principales deltas de Colombia (Restrepo y López, 2008) y el análisis del transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano (Restrepo et al., 2015). Las investigaciones en el área de estudio señalan la variabilidad de las propiedades texturales, la concentración, la densidad efectiva y la velocidad de sedimentación en la desembocadura del río Magdalena (Ospino, 2019; Higgins et al., 2017; Hernández, 2017; Restrepo, 2014).

Los estudios de la composición química mineralógica de los sedimentos en la desembocadura del río Magdalena son pocos. Riezebos (1979) determina la variabilidad composicional y textural de los minerales pesados, opacos y translúcidos en sedimentos arenosos de fondo del canal del río Magdalena, con los que se realizó un análisis microscópico de minerales pesados (rango de tamaño de arena: 420-50 μm) y un estudio de las fluctuaciones de estos en las proporciones minerales, teniendo en cuenta las relaciones granulométricas. Además, Klingebiel y Vernet (1979) caracterizaron sedimentos obtenidos mediante 12 corazonas en la plataforma continental entre Cartagena y la desembocadura del río Magdalena; indicando la presencia de sedimentos con una fuerte concentración de fracción arcillosa (50 - 70 % con tamaños entre 2 y 50 μm) y un porcentaje menor al 10% correspondiente a la fracción arenosa.

Investigaciones recientes en Bocas de Ceniza contribuyen al entendimiento de la dinámica sedimentaria en la zona. Restrepo et al. (2018), determina que en la desembocadura del río Magdalena se forma una ZMT con Concentración de Sedimento Suspendido (CSS) > 4500 mg l^{-1} , que presenta variaciones en su localización, magnitud y estructura de acuerdo con las condiciones de formación y estacionalidad hidrológica y oceanográfica. Entre los causantes de generación de la ZMT, Restrepo et al. (2018) menciona: i) la convergencia de las capas estratificadas cerca al punto nodal, (ii) la supresión de la turbulencia ocasionada por la estratificación y alta concentración de sedimentos y (iii) posiblemente por la ocurrencia de procesos de floculación. De acuerdo con lo anterior, la desembocadura del río Magdalena en su ZMT indica ser una zona apropiada para realizar una caracterización y cuantificación de los sedimentos en suspensión que permita evidenciar la potencial ocurrencia de procesos de floculación.

2. Planteamiento del problema

Los estuarios son sitios donde interactúan masas de agua, sedimentos y nutrientes de los ríos y océanos (Milliman y Farnworth, 2011). Actúan como una trampa en la que se depositan grandes cantidades de MPS transportado por los ríos (Woodruff et al., 2001). El transporte de sedimentos en ambientes estuarinos es un tema de gran relevancia científica, debido a su efecto en la transferencia de sedimentos y nutrientes hacia el océano y en la regulación de los ciclos geoquímicos (Wang et al., 2013). Los procesos de transporte, transformación y deposición de partículas o sedimentos en sistemas estuarinos están influenciados principalmente por las características texturales y la distribución de tamaño del MPS (Bainbridge et al., 2012). Por consiguiente, la caracterización de los sedimentos contribuye al entendimiento de la dinámica de los procesos de sedimentación en ecosistemas estuarinos (Sahin et al., 2017).

Los estuarios, especialmente las ZMT, presentan las condiciones propicias para la formación de flóculos (Thomas et al., 2017; Safak et al., 2013). En la ZMT se observan las mayores concentraciones de MPS a lo largo del delta/estuario, y tiene un papel fundamental en la circulación estuarina y en la transferencia de sedimentos hacia el océano (Dyer, 1995). En este sentido, el interés se ha centrado en la caracterización y cuantificación de las propiedades de los sedimentos en suspensión en la ZMT de sistemas estuarinos para evidenciar la ocurrencia de procesos de floculación.

En un ambiente en el que la floculación y la alteración de las características de las partículas afecta los procesos marino-costeros e influye en la evolución y dinámica estuarina (Restrepo et al., 2018; Sahin et al., 2017), puede surgir la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la variabilidad de las propiedades texturales y composicionales de los sedimentos en suspensión en la columna de agua del río Magdalena en su ZMT, en condiciones de estratificación?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Determinar la variabilidad composicional y textural de los sedimentos en suspensión en las capas de superficie, medio y fondo de la columna de agua ubicada en la ZMT de la desembocadura del río Magdalena en condiciones de estratificación.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer la clasificación textural de los sedimentos en suspensión en la columna de agua.
- Identificar la presencia de los flocs, a través de imágenes computarizadas de las secciones delgadas de los sedimentos.
- Determinar la composición química y mineralógica de las partículas en suspensión en la columna de agua.

4. Metodología

4.1. Área de estudio

El río Magdalena, con un curso de 1540 km y un área de drenaje de 257,400 km², es el río más extenso e importante de Colombia. Nace en la Cordillera Central (sur de Colombia, 1°45'N, 76°30'W) a una altura de 3600 m y su cuenca ocupa el 22.5% del territorio nacional. Su valle se ubica entre las cordilleras Central y Oriental del Norte de los Andes, y en su medio-bajo ingresa a una depresión tectónica activa conocida como la Depresión Momposina (Restrepo et al., 2005).

La principal desembocadura activa del río es denominada Bocas de Ceniza y se ubica en el departamento del Atlántico (Figura 1). Bocas de Ceniza es un delta tropical con forma

arqueada y un área subaérea de 1690 km² (Restrepo et al., 2018), que forma un sistema depositacional-acrecionario localizado en un margen activo en el que colisionan las placas Suramericana, Caribe y Nazca (Duque-Caro, 1980). Su formación comenzó en el Plioceno Medio y ha migrado en sentido suroeste-noreste debido a cambios tectónicos en la provincia Sinú-San Jacinto, en la que se ubica el sistema deltaico (Duque-Caro, 1980). Estas migraciones y el aporte de sedimentos del río han permitido la depositación de sucesiones terrígenas Plioceno-Cuaternarias en una geometría lobular localizada en la plataforma somera (Molinares et al., 2012).

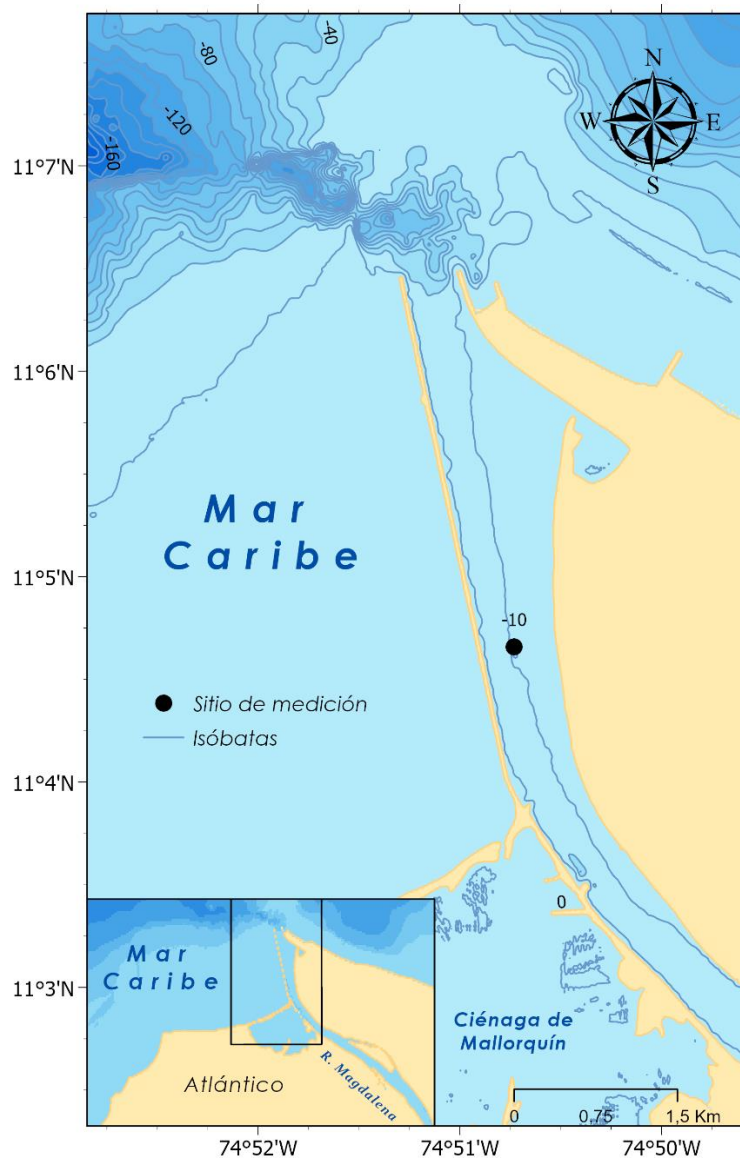


Figura 1. Localización del sitio de medición.

El área de estudio presenta un dominio micro-mareal con marea mixta, principalmente diurna, con rangos que varían entre 0.45 y 0.64 m (Restrepo y López, 2008). La precipitación anual promedio es de 1500 mm/a, registrando los mayores valores en los meses de mayo y octubre (Madrid, 2015). El clima predominante es árido – semiárido, con un régimen de temperaturas promedio de 27° C (Bernal et al., 2006). Las épocas climáticas están condicionadas por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que define cuatro épocas: seca mayor que comprende desde diciembre hasta abril, seca menor o Veranillo de San Juan de julio a agosto, lluviosa mayor desde septiembre hasta noviembre y lluviosa menor de mayo a junio (Gómez, 2015). Este patrón climático es afectado por la influencia de las corrientes de chorro del norte y del oeste (e.g. chorros del Chocó y San Andrés), los efectos orográficos generados por las cadenas montañosas cercanas (e.g. Cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta) y el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en su fase cálida (El Niño) y fría (La Niña) (Bernal et al., 2006).

La desembocadura del Magdalena tiene un sistema deltaico de dominio mixto, con influencia por el oleaje y los aportes fluviales (Restrepo, 2014). La influencia del oleaje en el delta está dada por la presencia de un oleaje de fondo (e.g. swell) con alturas significativas (H_s) de 2.2 ± 1.1 m, periodo pico de 6.7 ± 2.3 s y proveniencia del Noreste (Ortiz y Rosales, 2012). El aporte fluvial del delta es generado por 142.0×10^6 t a⁻¹ de sedimentos en suspensión y un flujo promedio de 205.1 km³ a⁻¹ del río Magdalena (Restrepo, 2014).

De acuerdo con Klingebiel y Vernet (1979), los sedimentos de Bocas de Cenizas se caracterizan por una fuerte concentración de fracción arcillosa (50 - 70 % con tamaños entre 2 y 50 μ m) y un porcentaje menor al 10% correspondiente a la fracción arenosa. La fracción arcillosa está compuesta por micas y arcillas de tipo Clorita Vermiculita. Mientras que la fracción arenosa está compuesta por granos de cuarzo angulares y brillantes, micas y algunos

minerales coloreados y partículas ferruginosas. La microfauna calcárea en las muestras de sedimento es muy escasa y la proporción de carbonato es insignificante.

4.2. Recolección de datos y muestras: salida de campo

Para cumplir con los objetivos propuestos se llevó a cabo una salida de campo, en condiciones de bajo caudal y durante diferentes condiciones del ciclo de marea (14-17 de marzo de 2018). La campaña tuvo una duración de 72 horas, durante las cuales se recolectaron muestras de agua y se realizaron mediciones in-situ de la concentración y distribución de tamaño del sedimento suspendido a lo largo de la columna de agua. Las mediciones se realizaron aproximadamente 3 km aguas arriba de la desembocadura del río Magdalena (Figura 1), con el objetivo de realizar mediciones en el frente de convergencia salino y la ZMT (Restrepo et al., 2018).

A lo largo de la columna de agua se realizaron mediciones horarias de concentración y distribución de tamaño de las partículas, utilizando sensores ópticos de difracción láser in-situ LISST-200X (Laser In-Situ Scattering Techniques – LISST). El LISST-200X es un equipo con una tasa de muestreo de 1 Hz, que permite mediciones directas y de alta resolución temporal de la distribución del tamaño de partículas en suspensión. La distribución de tamaño de partículas del LISST-200X tiene un rango comprendido entre 1 – 500 μm , dividido en 36 clases de tamaño (Apéndice A). Adicionalmente, se recolectaron muestras de agua con un Muestreador Horizontal, cada cuatro horas y en tres profundidades diferentes en la columna de agua (capa superficial, media y fondo).

4.3. Procesamiento de datos

Para determinar las propiedades texturales de los sedimentos se empleó el software GRADISTAT (Blott y Pye, 2001), ingresando los porcentajes correspondientes a cada uno de los 36 tamaños de clases medidos por el LISST-200X. Este software proporciona estadísticos

tales como el D_{10} , D_{50} , D_{90} , tamaño medio y clasificación, entre otros. El tamaño medio hace referencia al promedio de la distribución y muestra su clasificación, permitiendo definir el tipo de sedimento de acuerdo con la escala de tamaños modificada de Udden (1914) y Wentworth (1922) (Tabla 1).

La clasificación o selección indica la similaridad entre los tamaños de todas las partículas que componen la muestra, siendo desde extremadamente mal clasificado hasta muy bien clasificado (Tabla 2). Estos parámetros estadísticos se calculan aritmética y geoméricamente en micrones (μm), y logarítmicamente utilizando la escala phi (ϕ) (Krumbein y Pettijohn, 1938); teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

Media:
$$x_{\phi} = \frac{\sum f m_{\phi}}{100} \text{ Ec. 1}$$

Selección:
$$\sigma_{\phi} = \frac{\sum (m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^2}{4} \text{ Ec. 2}$$

donde m es el punto medio de cada fracción de tamaño de grano en phi (m_{ϕ}), y f es la proporción de una fracción de tamaño de grano dada en todo el sedimento.

Tabla 1. Escala de distribución de tamaño de Udden (1914) and Wentworth (1922), modificada y adaptada en el software GRADISTAT

Clase Textural	Tamaño		Clase Textural	Tamaño	
	μm	phi		μm	phi
Gravas muy finas	2000	-1	Limo muy grueso	31	5
Arenas muy gruesas	1000	0	Limo grueso	16	6
Arenas gruesas	500	1	Limo medio	8	7
Arenas medias	250	2	Limo fino	4	8
Arenas finas	125	3	Limo muy fino	2	9
Arenas muy finas	63	4	Arcilla	0	10

El software clasifica los sedimentos de acuerdo con la escala de tamaños y suministra una descripción física del grupo textural al que pertenece la muestra. Los datos proporcionados

están basados en una modificación de la escala de distribución de tamaño de Udden (1914) y Wentworth (1922) (Tabla 1), así como en los indicadores de clasificación de Folk y Word (1975) (Tabla 2).

Por último, los datos fueron procesados en el software MATLAB (2012b) empleando la técnica de interpolación lineal para homogeneizar el conjunto de datos y poder representarlos en gráficos de contornos (Restrepo et al., 2018). En los gráficos de contorno se representa la concentración, la distribución de tamaño medio y la clasificación de las partículas, con respecto a la profundidad normalizada y el tiempo de medición.

Tabla 2. Indicadores de clasificación. Tomado de: Folk y Ward, 1957

Desviación Estándar	Clasificación
$<0.35 \phi$	Muy bien clasificado
0.35ϕ a 0.50ϕ	Bien clasificado
0.50ϕ a 0.70ϕ	Moderadamente bien clasificado
0.70ϕ a 1.00ϕ	Moderadamente clasificado
1.00ϕ a 2.00ϕ	Pobrementemente clasificado
2.00ϕ a 4.00ϕ	Muy pobrementemente clasificado
$>4.00 \phi$	Extremadamente mal clasificado

4.4. Procesamiento de las muestras

Las muestras de agua se filtraron empleando filtros de fibra de vidrio Whatman GF/C de 47 mm de diámetro y un tamaño de poro de 1 micra, con la finalidad de obtener muestras de los sedimentos en suspensión. A cada filtro se le retiró la humedad en un horno a 105 °C durante 30 minutos, y 10 muestras de sedimento fueron procesadas en el laboratorio Minerlab para realizar secciones delgadas.

Las secciones o láminas delgadas son preparaciones que se realizan a rocas o sedimentos para visualizar sus características morfológicas y composicionales a través de equipos como el microscopio petrográfico o electrónico (e.g. Miguens (2016)). En el caso de

los sedimentos, las secciones delgadas consisten en sedimentos sueltos esparcidos sobre una resina y adheridos a láminas de vidrio.

4.5. Análisis de las muestras: Petrografía, Metasystem y Raman.

La identificación de partículas se realizó a 10 secciones delgadas de muestras recolectadas a diferentes horas y profundidades, a través de un microscopio petrográfico del laboratorio de Petrografía de la Universidad del Norte. El microscopio petrográfico es una herramienta simple de observación directa, en la que el usuario observa las características ópticas sin cálculos o interferencias. Este se compone de dos sistemas de lentes convergentes que generan un aumento en la imagen real: los oculares y el objetivo (Cady, 1965). Este instrumento tiene la capacidad de utilizar dos tipos de luces: luz transmitida plana y luz polarizada cruzada. El análisis de las muestras se realiza con objetivos de 10X y 20X en luz transmitida plana y polarizada cruzada (Lynn et al., 2008).

El proceso de conteo de partículas se realiza por el método lineal, a tres secciones delgadas correspondientes a las muestras de sedimentos en suspensión de superficie, medio y fondo, tomadas a las 12 horas del primer día de medición (D1H12). Este método consiste en trazar una línea recta e identificar y contar 100 granos o partículas ubicadas en líneas equidistantes de 500 micras, en cada sección delgada. Además de la identificación de cada partícula, se toman mediciones de tamaño (diámetro corto y diámetro largo), redondez (muy angular, angular, subangular, subredondeado y redondeado) y esfericidad (baja, media y alta). En el conteo se tuvieron en cuenta características texturales de distribución de tamaño, con base en la escala de Udden (1914) y Wentworth (1922) modificada y adaptada en el software GRADISTAT (Tabla 1). Los resultados texturales se contrastan, por medio de un gráfico comparativo, con los datos texturales obtenidos por medio del software GRADISTAT.

La digitalización de las muestras se realiza a través de la plataforma de escaneo Metasystem del *Microfluid Spectral Laboratory* de la Universidad Nacional. Este equipo consiste en un microscopio motorizado con un escáner que permite la automatización de imágenes de las secciones delgadas. El instrumento tiene la misma característica de objetivos y luces que el microscopio petrográfico, pero utiliza campos de imagen individuales para lograr una mejor calidad. Las secciones delgadas se digitalizaron con aumentos de 5, 10, 20 y 50X en luz transmitida plana y polarizada cruzada.

En último lugar, se usa un Raman del *Microfluid Spectral Laboratory* de la Universidad Nacional para caracterizar las partículas primarias de las muestras de sedimento. La espectroscopía Raman es una técnica no destructiva basada en la dispersión inelástica de la luz por la materia en su estado sólido, líquido o gaseoso, que permite obtener información química y estructural de muestras con tamaños desde 1 μm de diámetro (Frezzotti, 2012). El proceso consiste en hacer incidir un haz de luz monocromática, con una frecuencia específica, sobre el material a analizar (Otero y Cano, 2015). La luz monocromática dispersada por la materia contiene radiaciones con frecuencias diferentes a la luz excitante. Cada material genera un conjunto de valores de frecuencias característicos de su estructura poliatómica y de la naturaleza de los enlaces químicos que la forman (Frezzotti, 2012).

La espectroscopía Raman es la medida de la cantidad de fotones que se generan por la dispersión inelástica de la luz. Un espectro Raman es una gráfica que representa la intensidad de la luz, expresada en unidades arbitrarias o recuentos ('counts'), versus la frecuencia de la luz dispersa o vibraciones de Raman que se expresa en unidades de frecuencia: números de onda o 'wavenumbers' ($\tilde{\nu} = \nu/c = 1/\lambda$ en cm^{-1} , donde c es la velocidad de la luz) (Frezzotti, 2012). Los resultados obtenidos por el Raman fueron contrastados con los espectros de la base de datos RRUFF Project (University of Arizona, 2020) para identificar las partículas.

5. Resultados

5.1. Distribución de tamaño de partículas

Los gráficos de contorno representan los parámetros medidos con respecto a la profundidad normalizada y el tiempo de medición (Figura 2). Cada gráfico tiene perfiles verticales que muestran en detalle las variaciones de las propiedades de las partículas con respecto a la profundidad, haciendo énfasis en puntos seleccionados (P1, P2, P3 y P4). Se ubican junto a un gráfico que muestra el comportamiento de los principales forzadores durante el tiempo de medición: marea, caudal y parámetro de estratificación (Figura 2C).

Se observa una tendencia descendente en el nivel, con valores desde 10.65m hasta 10.45m, a medida que avanza el tiempo de medición. Además, se presentan dos pleamares y dos bajamares en un día lunar, que indican una marea diurna mixta. El parámetro de estratificación muestra un sistema estratificado ($n_s > 1$) durante todo el tiempo de medición, destacando una influencia de la marea por el aumento de la variable en las pleamares y la disminución en las bajamares. Finalmente, el caudal también disminuyó durante los días de recolección de datos, con valores desde $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta $3600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

De acuerdo con los indicadores del tamaño medio de partículas del software GRADISTAT y la clasificación establecida por Udden (1914) y Wentworth (1922), en la desembocadura del río Magdalena se encuentran arenas finas (2.00ϕ a 3.00ϕ), arenas muy finas (3.00ϕ a 4.00ϕ), limos muy gruesos (4.00ϕ a 5.00ϕ), limos gruesos (5.00ϕ a 6.00ϕ), limos medios (6.00ϕ a 7.00ϕ) y limos finos (7.00ϕ a 8.00ϕ) (Figura 2A). El 15.7% corresponde a partículas de tamaño arena (-1.00ϕ a 4.00ϕ) y el 84.3% de tamaño limo (4.00ϕ a 8.00ϕ). La distribución muestra un sistema dominado por partículas en el rango de tamaño de limos finos y medios (6.00ϕ a 8.00) en las capas superficial y media, seguidos de arenas finas y muy finas (2.00ϕ a 4.00ϕ) en la capa de fondo de la columna de agua.

Los limos predominan en la mayor parte del tiempo, excepto en las pleamares diurnas y bajamares de los dos primeros días de medición. Los perfiles verticales de distribución de tamaño muestran un descenso en el valor de ϕ , que corresponde a un aumento en el tamaño de las partículas a medida que incrementa la profundidad, indicando que los sedimentos de mayor tamaño se encuentran en la capa de fondo (Figura 2D).

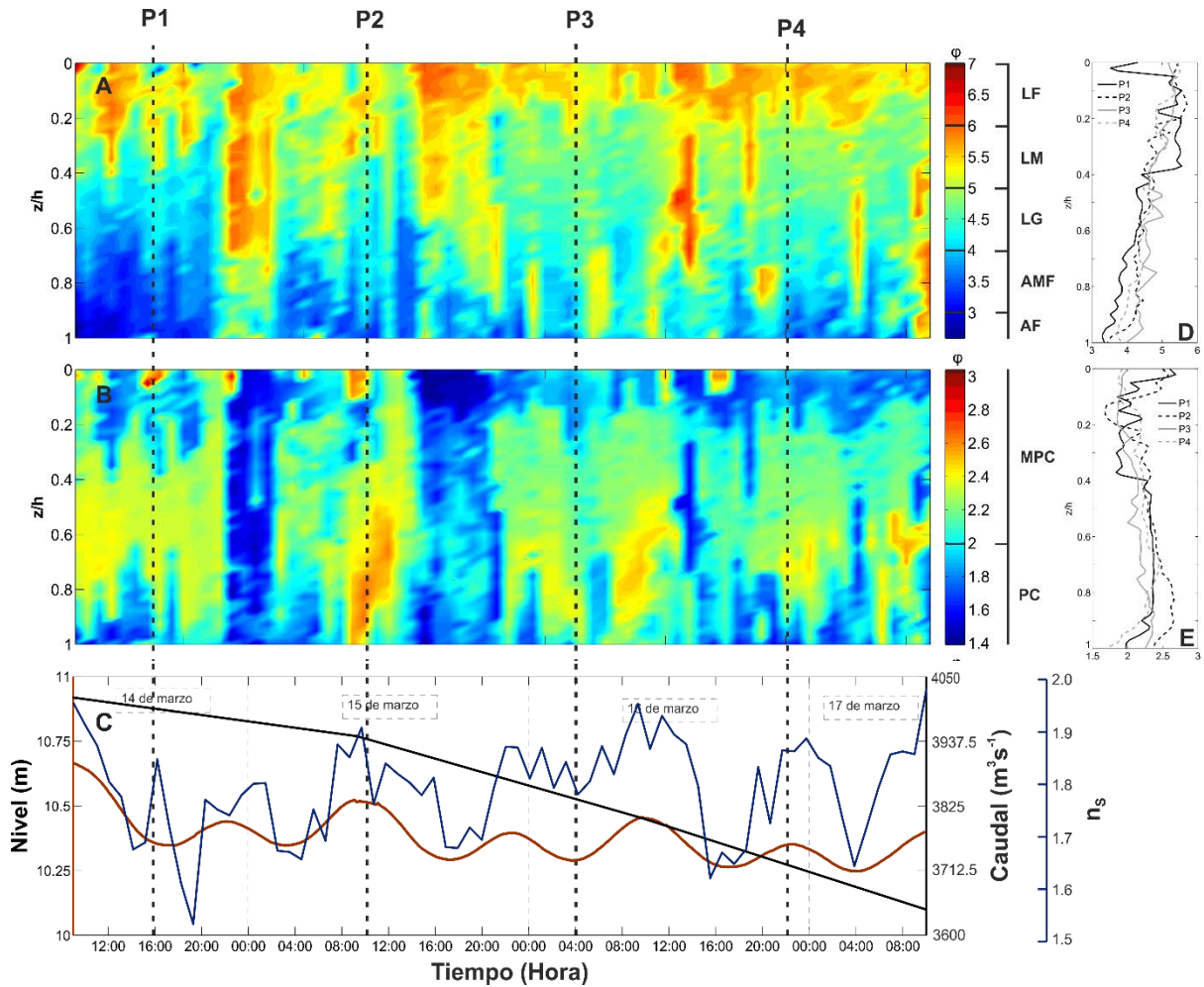


Figura 2. Parámetros estadísticos mediante el método de Folk y Ward (1957): A) Tamaño medio (AF - Arenas finas; AMF- Arenas muy finas; LG - Limos gruesos; LM - Limos medios y LF - Limos finos), B) Selección (PC - Pobrementemente clasificado y MPC - Muy pobrementemente clasificado), C) Gráfico de forzadores: Marea (línea naranja), Caudal (línea negra) y Parámetro de estratificación (línea azul), D) Perfiles verticales de tamaño medio, E) Perfiles verticales de selección.

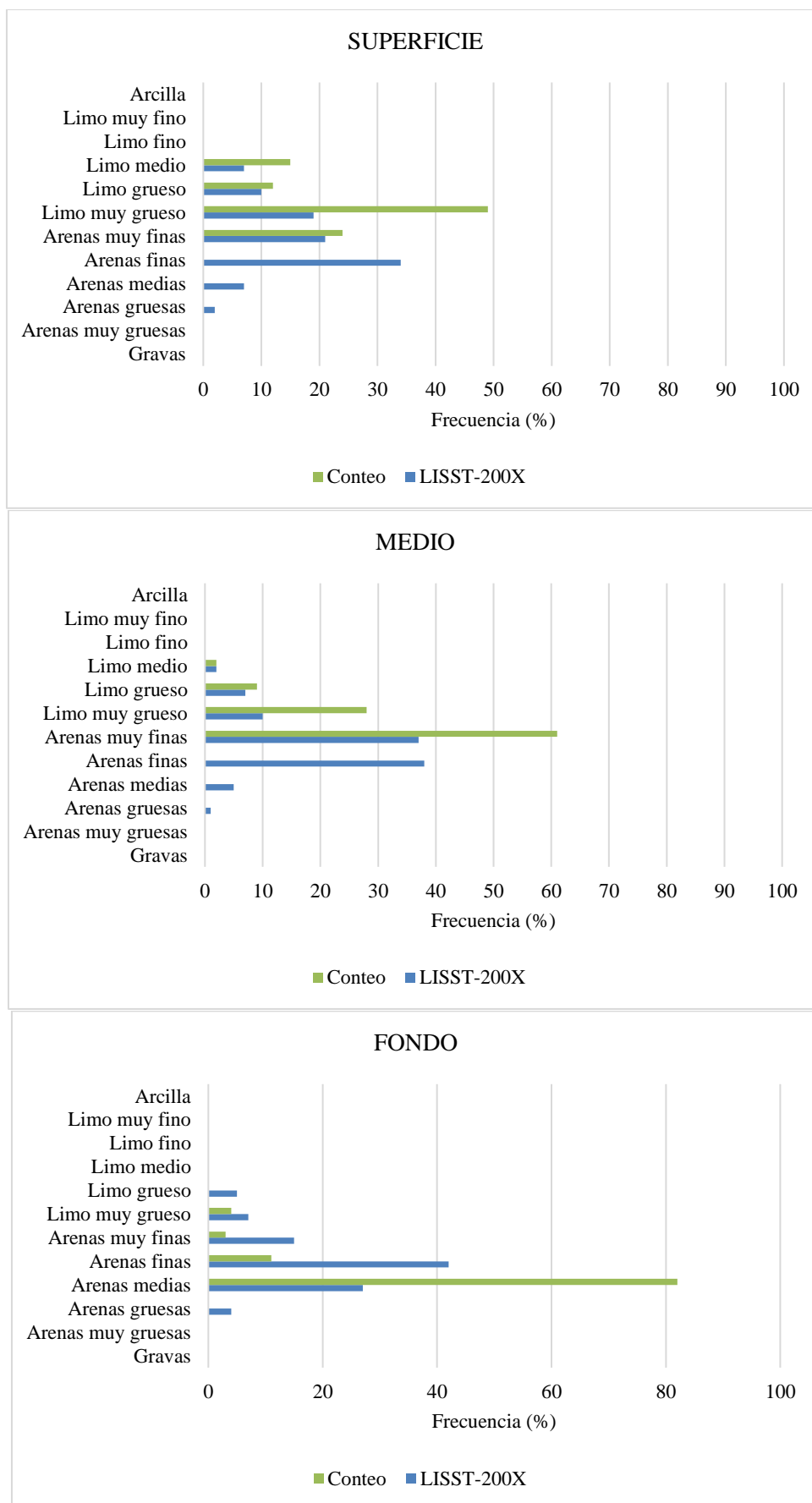


Figura 3. Distribución de tamaño: LISST-200X (GRADISTAT) y Conteo.

El índice de clasificación o selección evidencia que el 39.6% de los sedimentos está pobremente clasificado (1.00ϕ a 2.00ϕ) y el 60.4% está muy pobremente clasificado (2.00ϕ a 4.00ϕ) (Figura 2B). Los sedimentos muy pobremente clasificados ocupan gran parte de la columna de agua durante todo el tiempo de medición. Sin embargo, se destaca que los mayores valores de ϕ para la selección se observan en las pleamares, como es el caso de la pleamar diurna del segundo día. Por su parte, los perfiles verticales no muestran ninguna tendencia a medida que avanza la profundidad (Figura 2E).

El conteo por medio del microscopio petrográfico se realizó a las 3 muestras D1H12 (capa superficial, media y fondo) y sus resultados se observan en la Figura 3, donde es posible contrastarlos con los datos obtenidos por el software GRADISTAT para los mismos tiempos y profundidades. Al igual que el análisis de GRADISTAT, este conteo revela una tendencia de incremento en el tamaño de las partículas a medida que aumenta la profundidad. Sin embargo, se observan diferencias notorias en estas aproximaciones. El software GRADISTAT sugiere la presencia de partículas con tamaños que corresponden desde limo medio hasta arenas muy gruesas, mientras que en el conteo las partículas están agrupadas en un menor rango de tamaños, correspondientes a tamaños de limo medio hasta arenas medias. Por ejemplo, en la capa de fondo se observan partículas en los rangos desde limo grueso hasta arenas muy gruesas en el resultado de GRADISTAT, mientras que en el resultado del conteo la distribución varía entre limo muy grueso y arenas medias.

5.2. Concentración de sedimentos

Los valores de concentración de sedimentos son expresados en Volumen de Concentración (VC) y presentan un rango entre $210 \mu\text{L L}^{-1}$ y $1350 \mu\text{L L}^{-1}$ (Figura 4). Los mayores valores de VC se observan en la capa de fondo durante el primer día de medición, registrándose una variación comprendida entre $650 \mu\text{L L}^{-1}$ y $1350 \mu\text{L L}^{-1}$. La concentración de

sedimentos durante el resto del tiempo de medición mostró un comportamiento homogéneo ($VC < 500 \mu\text{L L}^{-1}$), con un leve incremento de acuerdo con el aumento de profundidad.

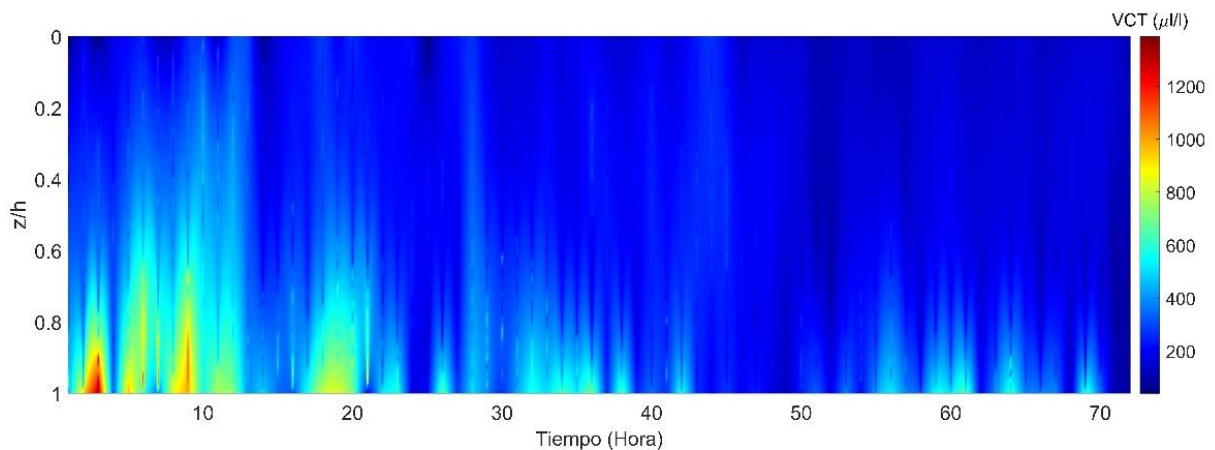


Figura 4. Volumen de concentración a lo largo del tiempo de medición en toda la columna de agua.

5.3. Análisis microscópico de las partículas

Las 10 secciones delgadas de los sedimentos fueron observadas y analizadas a través de un microscopio petrográfico con objetivos de 10 y 20X, en luz transmitida plana y polarizada cruzada (Figura 5). Sin embargo, solo las secciones de las 3 muestras D1H12 se analizaron en un microscopio motorizado o Metasystem (Figura 6).

5.3.1. Fotografías de las partículas en las secciones delgadas

En la Figura 5 se observa una similitud en el tipo y el tamaño de partícula en las diferentes profundidades, evidenciando en cada imagen la presencia de partículas aglomeradas que hacen referencia a los flóculos. Además, se destaca la presencia de fibra textil, tipo II en Figura 5B y tipo I en la Figura 5C. Finalmente, en cada muestra se observa muy poca similitud entre los tamaños de las partículas, confirmando su pobre clasificación.

En las fotografías obtenidas por el Metasystem se observan características similares a las mencionadas en el microscopio petrográfico, con una mayor resolución y visualización de las imágenes, teniendo un mayor detalle la aglomeración de partículas en los flocs (Figura 6).

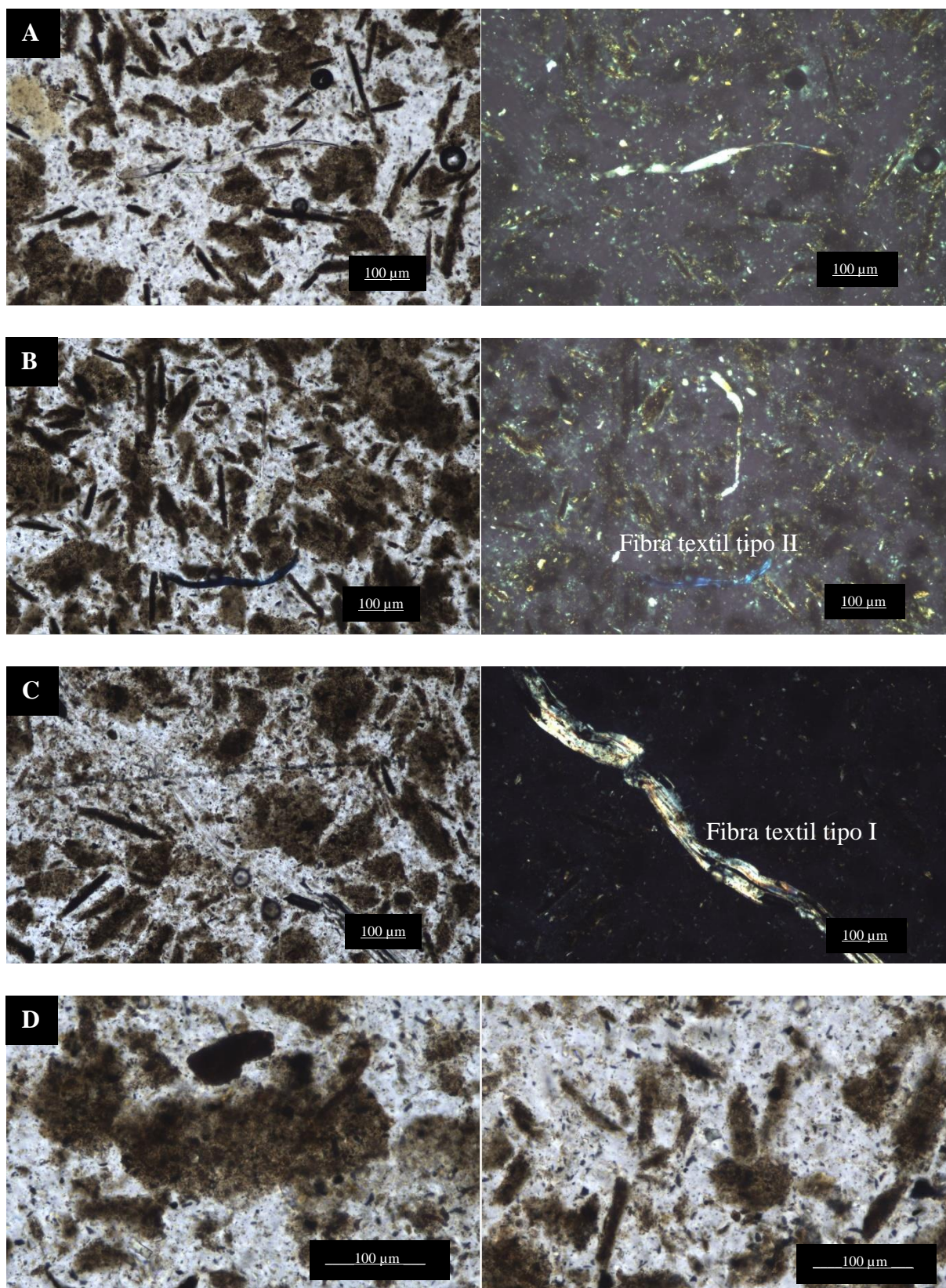


Figura 5. Fotografías de los sedimentos en microscopio petrográfico, con objetivos de 10 y 20X, en luz transmitida plana (columna izquierda) y luz polarizada cruzada (columna derecha): A) Superficie, B) Medio, C) Fondo, D) Aglomerado de partículas (Flóculo).

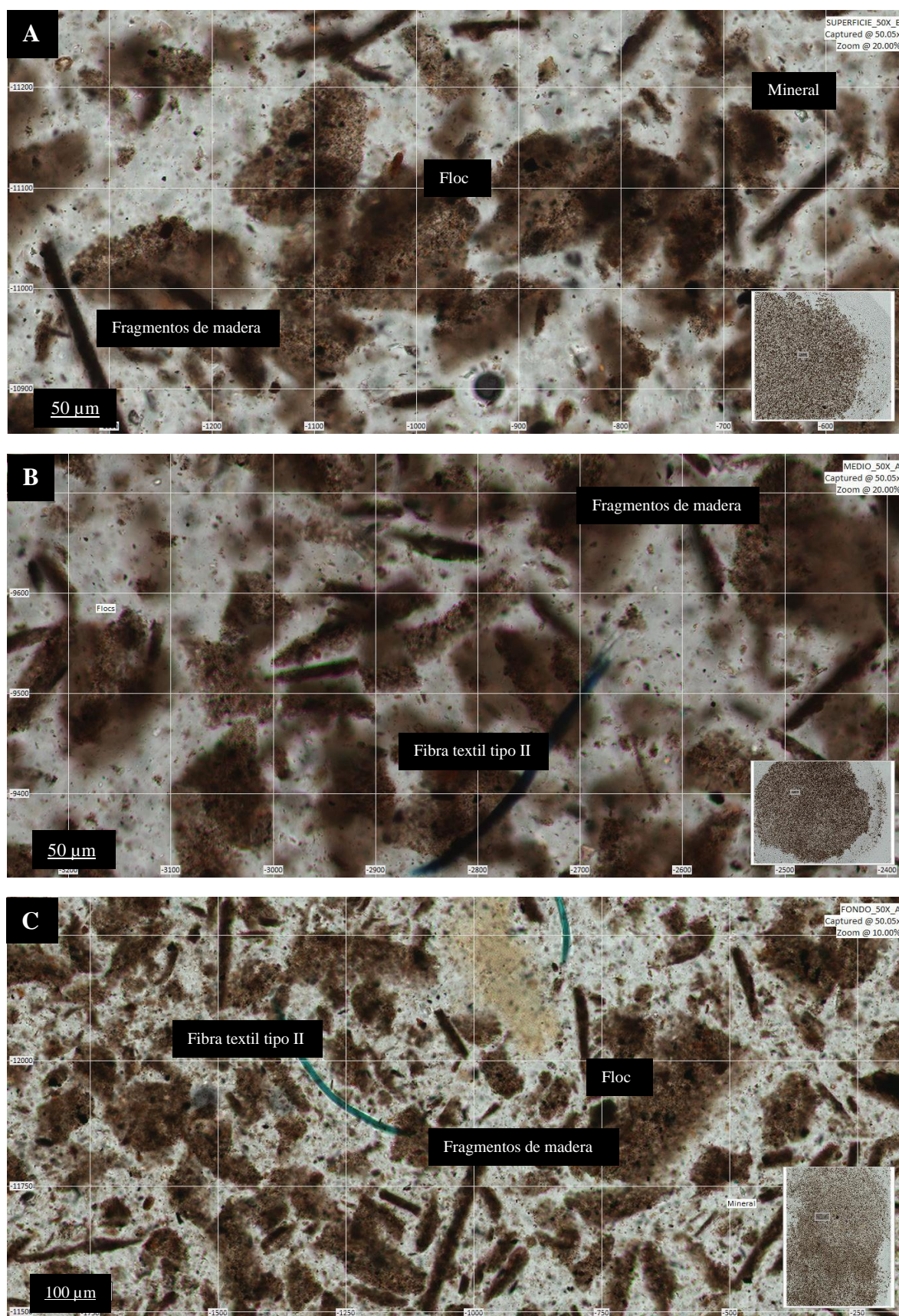


Figura 6. Fotografías de los sedimentos en microscopio motorizado: A) Superficie, B) Medio, C) Fondo.

5.3.2. Distribución composicional de las partículas

Durante la revisión general de las secciones delgadas, se identificaron 8 partículas: (1) sílice, que corresponde a minerales con contenido de SiO₂; (2) minerales no identificados debido al tamaño menor a 20 µm; (3) fragmentos de madera; (4) flóculos; (5) fibra textil tipo I; (6) fibra textil tipo II, los cuales corresponden a fibras textiles diferentes que se presentan como micro-plástico; y (7) contaminación por papel filtro y milimétrico. La contaminación por papel filtro y milimétrico no fue considerada en el conteo, debido a que constituye un error en el procesamiento de las muestras. El sesgo del método lineal con los tamaños de las partículas no permitió el conteo eficaz en todas las partículas de menor tamaño como los minerales no identificados.

La distribución composicional de las partículas identificadas, por medio del conteo, en las muestras D1H12 de superficie, medio y fondo se observa en la Figura 7 y la descripción de sus propiedades ópticas se presenta en la Tabla 3. Se destaca una tendencia de incremento en la cantidad de flóculos presentes en los sedimentos a medida que aumenta la profundidad, mientras que el porcentaje de fragmentos de madera disminuye. Las cuatro partículas restantes conservan porcentajes similares a lo largo de la columna de agua, sin presentar tendencia.

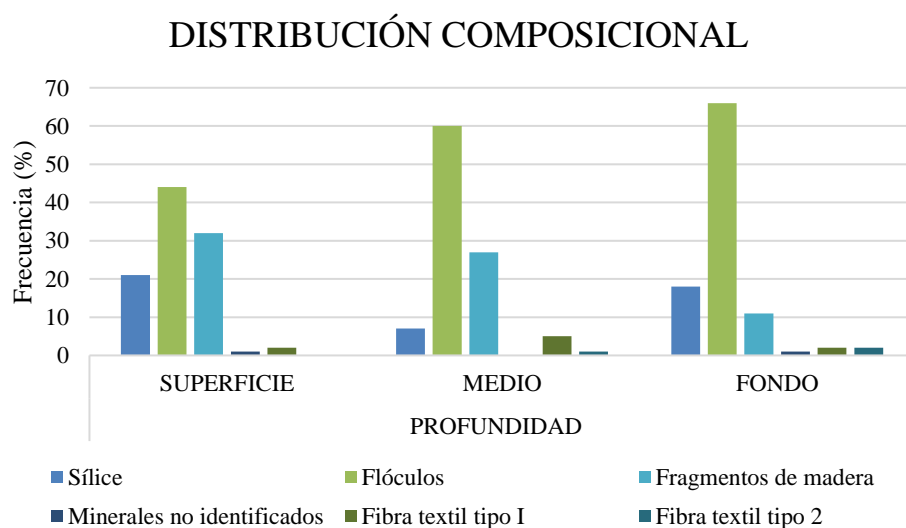


Figura 7. Distribución composicional de los sedimentos en la columna de agua

Tabla 3. Propiedades ópticas de las partículas

CLASIFICACIÓN	PROPIEDADES ÓPTICAS
Sílice	Incoloro, relieve muy bajo - bajo, colores de interferencia grises de primer orden y forma subhedral.
Flóculos	Color café oscuro, forma anhedral y subredondeada.
Fragmentos de madera	Color café oscuro, forma subhedral y elongada.
Minerales no identificados	Color verde claro a incoloro, pleocroísmo leve, relieve bajo-medio, colores de interferencia altos de tercer-cuarto orden, forma subhedral.
Fibra textil tipo I	Incoloro, relieve muy bajo - bajo, colores de interferencia muy altos, irisaciones, forma subhedral.
Fibra textil tipo II	Color azul, relieve bajo - medio, colores de interferencia azules muy altos, irisaciones, forma subhedral y elongada.

5.4. Distribución mineralógica – Espectroscopía de Raman

El método de espectroscopía de Raman se aplicó a las secciones delgadas de los sedimentos de las 3 muestras D1H12 (superficie, medio y fondo) (Figura 8). Al contrastar los resultados obtenidos por el Raman con los espectros de RRUFF Project se identificaron los minerales, teniendo en cuenta el valor de ‘*quality*’ que indica la similitud entre ambos espectros. Sin embargo, se debe aclarar que con algunos cristales no se obtuvo un espectro tan cercano al estándar del RUFF Project (Apéndice B). Por ejemplo, el resultado para el cristal clasificado como Cuarzo tiene una similitud y un valor de ‘*quality*’ mayor que el de la Brookita (Figura 9). En síntesis, se identificaron química y mineralógicamente 12 tipos de partículas, en un total de 20 cristales en las muestras de sedimento (Tabla 4).

Los cristales identificados corresponden a: Biotita, Anatasa, Cuarzo, Marcasita, Pirita, Brookita, Goethita, Epidota, Antracita, Calcosina, Halita y Cannel Coal (Apéndice C). Además, estos se clasifican, de acuerdo con la escala de tamaños modificada de Udden (1914) y Wentworth (1922), entre arcilla, limo muy fino, limo fino, limo medio y limo grueso, con tamaños entre 1 y 35 μm (Tabla 4). La composición química y los valores de densidad de cada mineral se anexan a la tabla de distribución mineralógica, de acuerdo con la base de datos Mindat.org (The Hudson Institute of Mineralogy, 2020). Se observa que la mayoría de los

minerales con alta densidad y con contenido de Fe se encuentran en la capa de fondo, destacando una relación entre el aumento de la profundidad, la densidad y la composición de los minerales.

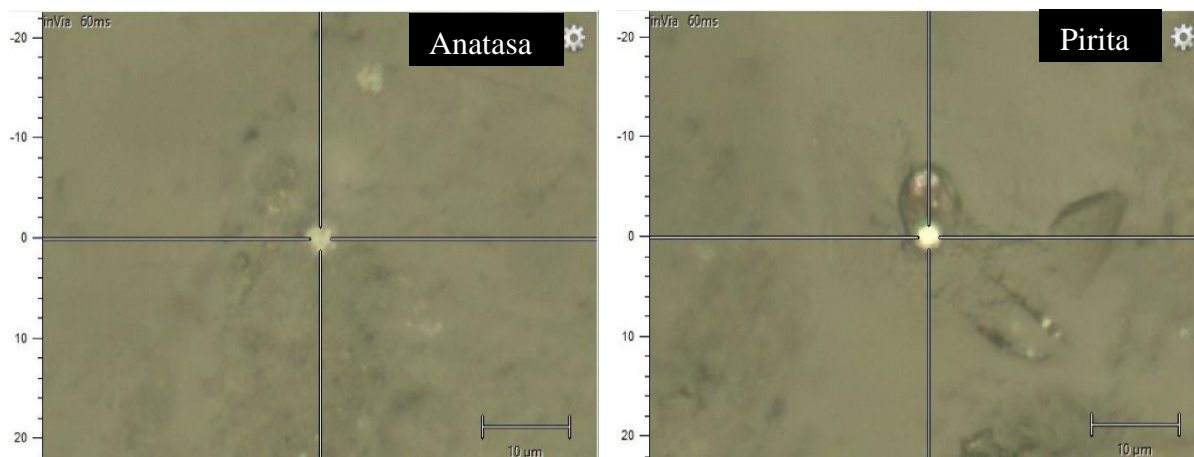


Figura 8. Fotografías de cristales, a través de espectroscopía de Raman.

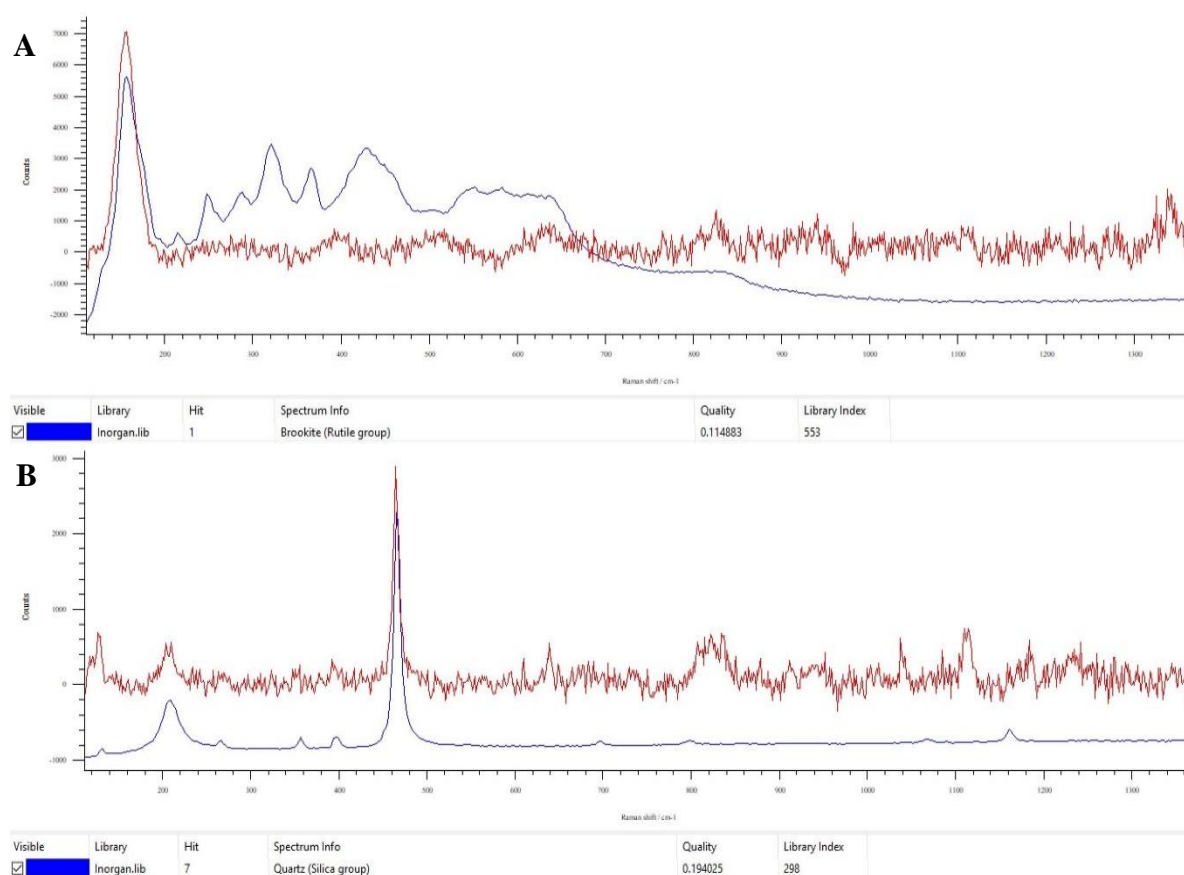


Figura 9. Resultados de la espectroscopia de Raman (rojo) y espectros estándar de RRUFF Project (azul). A) Espectro estándar Brookita; B) Espectro estándar de Cuarzo.

Tabla 4. Distribución mineralógica

Muestra	Cant.	Mineral	Fórmula Química	Densidad (gr/cm ³)	Diámetro medio (μm)	Clase mineral
Superficie	1	Cuarzo	SiO ₂	2,66	8,51	Tectosilicatos/ sílice
	1	Biotita	K(Fe ²⁺ /Mg) ₂ (Al/Fe ³⁺ /Mg) ([Si/Al]Si ₂ O ₁₀) (OH/F) ₂	3,09	10,06	Filosilicatos/ micas
	1	Anatasa	TiO ₂	3,89	3,23	Óxidos
Medio	1	Cannel Coal	-	0,8 - 0,9	15,76	Carbón bituminoso
	1	Antracita	-	1,2 -1,8	18,34	Carbón metamórfico
	1	Halita	NaCl	2	5,69	Haluros
	1	Calcosina	Cu ₂ S	5,65	1,87	Sulfuros
Fondo	3	Antracita	-	1,2 -1,8	24,67	Carbón metamórfico
	1	Cuarzo	SiO ₂	2,66	28,43	Tectosilicatos/ sílice
	1	Epidota	{Ca ₂ } {Al ₂ Fe ³⁺ } (Si ₂ O ₇) (SiO ₄) O(OH)	3,43	25,01	Sorosilicatos
	4	Anatasa	TiO ₂	3,89	13,75	Óxidos
	1	Brookita	TiO ₂	4,13	6,24	Óxidos
	1	Goethita	Fe ³⁺ O(OH)	4,18	35,76	Óxidos e hidróxidos
	1	Marcasita	FeS ₂	4,88	8,37	Sulfuros
	1	Pirita	FeS ₂	5,01	3,28	Sulfuros

6. Análisis de resultados

6.1. Distribución de tamaño de las partículas

Los parámetros texturales de los sedimentos presentan una variabilidad temporal y espacial, influenciada por los ciclos de marea. Los sedimentos en el rango de tamaño de limos prevalecen en las capas superficial y media, mientras que los sedimentos en el rango de tamaño de arena prevalecen en la capa de fondo (Figura 2A). Sin embargo, los sedimentos gruesos (2.00 φ a 4.00 φ) alcanzan la capa media en los momentos que la penetración de la cuña salina es más fuerte, durante la pleamar diurna. De igual forma, los sedimentos en el rango de tamaño de limos, que predominan en las capas media y superficie, alcanzan la capa profunda durante las bajamares, cuando la cuña salina tiene una penetración menor. Siendo así, se considera una relación entre la distribución del tamaño de grano de los sedimentos en la columna de agua y los ciclos de marea, que controlan el comportamiento y/o desplazamiento de la cuña salina. La

relación indica que los sedimentos de mayor tamaño predominan en las pleamares y los sedimentos de menor tamaño en las bajamares. Esta relación puede deberse a los cambios en la turbulencia ocasionados por la penetración de la cuña salina (Restrepo et al. 2018).

La selección o clasificación de los sedimentos en la columna de agua es un parámetro que muestra una dependencia a la prevalencia de un rango de tamaño. En la capa superficie y fondo se observan los sedimentos pobremente seleccionados, debido a que en la capa de superficie prevalecen los limos y en la capa fondo las arenas en pleamares y los limos en bajamares (Figura 2B). Los sedimentos muy pobremente clasificados se encuentran en la capa media debido a que el tamaño de los sedimentos presentes en esta capa varía de acuerdo con el ciclo de marea.

Al contrastar la distribución de tamaño entregada por el software GRADISTAT y la obtenida por medio del método de conteo lineal se observa un resultado similar (Figura 3). En ambos casos, se evidencia una tendencia de incremento en el tamaño de las partículas a medida que aumenta la profundidad. Sin embargo, a través del microscopio petrográfico se identifica que en las 10 secciones delgadas las partículas en los rangos de tamaño de arenas corresponden a aglomeraciones de diversas partículas. Estas aglomeraciones se identifican como flóculos o flocs, que son estructuras heterogéneas anhedrales compuestas por un componente de biota y biorgánico, partículas inorgánicas, poros y agua; siendo una evidencia clara de la presencia del fenómeno de floculación en el área de estudio. Con esto se deduce que los sedimentos identificados in-situ por el LISST-200X y representados por el software GRADISTAT en el rango de tamaño de arena también corresponden a flóculos.

6.2. Concentración de sedimentos en suspensión.

El VC de sedimentos en suspensión en la columna de agua presenta una gran variabilidad durante los dos primeros días de medición. Se observa la formación de una ZMT

en la capa media y fondo de la columna de agua, con valores de VC en un rango entre $500 \mu\text{L L}^{-1}$ y $1350 \mu\text{L L}^{-1}$. Restrepo et al (2018) reportó la presencia de esta ZMT en el área, para la misma época climática. Además, se destaca que en los tiempos y profundidades que se presenta la ZMT, también se observa una predominancia de los sedimentos gruesos (arenas finas y muy finas (2.00ϕ a 4.00ϕ)) que corresponden a los flóculos. En base a este comportamiento se deduce una relación entre la ZMT y el proceso de floculación. La concentración de sedimentos durante el resto del tiempo de medición mostró un comportamiento homogéneo ($VC < 500 \mu\text{L L}^{-1}$), con un leve incremento de acuerdo con la profundidad relacionado con el aumento en el tamaño de las partículas, que genera un efecto en su velocidad de sedimentación.

6.3. Distribución composicional de las partículas

De acuerdo con Droppo (2001) y Leppard (1992) las partículas inorgánicas de los flocs son generalmente óxidos o hidróxidos de hierro, minerales arcillosos y silicatos. Sus principales elementos son Fe, Al/Si o Si. Esto concuerda con la distribución composicional de las partículas en la columna de agua, especialmente en la capa de fondo (Tabla 4). El comportamiento de las partículas observadas puede describirse en función de su densidad y diámetro medio. Los minerales con mayor densidad se encuentran en la capa de fondo, mientras que los de menor densidad están en la capa de superficie. La presencia de la Anatasa y el Cuarzo en diferentes niveles es una evidencia de la relación entre la distribución de las partículas y su diámetro medio, debido a que los mayores diámetros se observan a mayor profundidad. Al mismo tiempo, la densidad tiene una relación directa con su composición química, siendo que los minerales con mayor densidad corresponden a los de mayor contenido de Fe.

Se evidencia un resultado positivo en análisis con Espectroscopía de Raman para determinar la composición de los sedimentos en suspensión en una columna de agua de la desembocadura del río Magdalena. Sin embargo, se recomienda para futuros análisis de este

tipo adicionar el proceso de decantación del sedimento antes de realizar la sección delgada. De esta forma será posible eliminar el material arcilloso y acumular los detritos o minerales, para obtener un mayor número de partículas identificadas. Finalmente, se destaca que a través del microscopio petrográfico se observó la presencia de fibra textil, micro-plástico, que es un indicador del nivel de contaminación actual en la cuenca del río Magdalena.

6.4. Floculación

El proceso de floculación es afectado por la concentración de sedimento en suspensión, la salinidad, la temperatura, el contenido de materia orgánica, la composición mineralógica y la colisión de partículas (Winterwerp 2002 y Burban et al., 1989). Sin embargo, la dependencia cuantitativa entre estos factores y la floculación aún es un tema de estudio (Chandra et al. 2012 y Eisma, 1986). El porcentaje de Materia Orgánica (%MO) y los valores de salinidad, densidad y temperatura durante el tiempo de medición fueron obtenidos y procesados por Ospino (2019). Los valores de salinidad se limitan en un rango entre 0.09 y 10, con un incremento con la profundidad. Se observan valores medios de 0.12 ± 0.04 en la capa superficial, 0.67 ± 0.41 en la capa media y 1.92 ± 1.23 en la capa de fondo (Apéndice D). El %MO presentó valores mínimos de 10%, 12% y 7% y valores máximos de 40%, 28% y 43% en la capa superficial, media y fondo, respectivamente. (Apéndice E).

La ZMT de la desembocadura del río Magdalena presenta las siguientes condiciones aptas para la formación de los flóculos: i) colisión de partículas, generada principalmente por la turbulencia, ii) altas tasas de concentración de sedimento en suspensión, iii) porcentajes elevados de MO, iv) concentración iónica generada por la salinidad, v) composición mineralógica dominada por minerales arcillosos y elementos de Fe, Al/Si y Si. Además, las imágenes microscópicas de los sedimentos son una evidencia de la presencia de los flóculos en la zona. Aclarando que durante la recolección y el procesamiento de las muestras no se favoreció el proceso de floculación en ningún momento.

El análisis de sistemas deltaicos/estuarinos de Colombia se ha basado en el uso de herramientas de modelamiento numérico para describir e interpretar los procesos de dinámica estuarina (e.g. Lonin, 2002; Restrepo 2014; Gómez 2015). La mayoría de los modelos aplicados en la desembocadura del río Magdalena han utilizado aproximaciones basadas en sedimentos no cohesivos. Sin embargo, con los resultados de esta investigación se evidencia que los sedimentos en esta zona son cohesivos. Por lo tanto, se debe generar un cambio significativo en la estimación de la velocidad de sedimentación, la resuspensión de sedimentos y los demás procesos relacionados, afectando los modelos de evolución morfológica y/o transporte de sedimentos. Siendo así, pese a los avances alcanzados sobre el conocimiento de la dinámica sedimentaria del río Magdalena, las propiedades y el transporte de los sedimentos y el papel de los procesos de floculación en la dinámica sedimentaria aún son temas de estudio.

7. Conclusiones

Las propiedades texturales y la concentración de los sedimentos presentaron variaciones a través de toda la columna de agua y durante todo el tiempo de medición. Estas variaciones se vieron influenciadas principalmente por el ciclo de marea, que controla el comportamiento y/o desplazamiento de la cuña salina. Por su parte, el parámetro de estratificación mostró un sistema estratificado todo el tiempo de medición, mientras que el caudal presentaba una tendencia descendiente. Durante los dos primeros días de medición, el VC mostró la formación de una ZMT que se encuentra asociada al aumento del tamaño de las partículas, por lo que los procesos de floculación pueden jugar un papel importante.

La distribución de tamaño de partículas muestra un sistema dominado por los sedimentos finos en la capa superficial y media. Mientras que en la capa de fondo se observa una distribución bimodal durante las bajamares y una tendencia a sedimentos gruesos durante las pleamares. Al contrastar la distribución de tamaño entregada por el software GRADISTAT y la obtenida por medio del conteo se observa una tendencia de incremento con la profundidad

en ambos casos. Sin embargo, a través del microscopio petrográfico se identifica que las partículas en los rangos de tamaño de arenas corresponden a flóculos, y con esto se deduce que los sedimentos identificados in-situ por el LISST-200X y representados por el software GRADISTAT en el rango de tamaño de arena corresponden a flóculos.

Las diferencias en la distribución de tamaño, la concentración de sedimento en suspensión, la turbulencia, los porcentajes de MO, la salinidad y la composición mineralógica garantizan la existencia de condiciones propicias para la ocurrencia de procesos de floculación. Sin embargo, la observación de los flóculos en las imágenes microscópicas de los sedimentos es la evidencia concluyente de su presencia en esta zona.

La mayoría de los modelos aplicados en la desembocadura del río Magdalena han utilizado erróneamente aproximaciones basadas en sedimentos no cohesivos, debido a resultados similares a los obtenidos por el LISST-200X. En estos modelos se debe generar un cambio que considere las propiedades de los sedimentos cohesivos y las alteraciones de la floculación en las partículas, debido a efectos en procesos como la velocidad de sedimentación que afectan la capacidad de retención de partículas en el estuario y cambian los modelos de evolución morfológica y/o transporte de sedimentos.

Referencias

- Bainbridge, Z. T., Wolanski, E., Álvarez-Romero, J. G., Lewis, S. E., & Brodie, J. E. (2012). Fine sediment and nutrient dynamics related to particle size and floc formation in a Burdekin River flood plume, Australia. *Marine pollution bulletin*, 65(4-9), 236-248. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.043>
- Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P., & Andrade, C. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 30(115), 195-208.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Braithwaite, K. M., Bowers, D. G., Smith, W. N., Graham, G. W., Agrawal, Y. C., & Mikkelsen, O. A. (2010). Observations of particle density and scattering in the Tamar Estuary. *Marine Geology*, 277(1-4), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.06.008>
- Burban, P.Y., Lick, W. y Lick, J. (1989). *La floculación de sedimentos de grano fino en aguas estuarinas. Journal of Geophysical Research*, 94 (C6), 8323. doi: 10.1029 / jc094ic06p08323
- Cady, J. G. (1965). Petrographic microscope techniques. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 604-631. doi:10.2134/agronmonogr9.1.c46
- Chandra, V., Mohapatra, PK y Nestmann, F. (2012). *Efecto de la profundidad del flujo, iones y salinidad en la concentración de sedimentos suspendidos. Revista de Ingeniería Hidráulica*, 138 (4), 348–352. doi: 10.1061 / (asce) hy.1943-7900.0000489
- Droppo, I. G. (2001). Rethinking what constitutes suspended sediment. *Hydrological processes*, 15(9), 1551-1564. <https://doi.org/10.1002/hyp.228>

Duque-Caro, H. (1980). Geotécnica y evolución de la región noroccidental colombiana. *Boletín geológico*, 23(3), 4-37. Recuperado a partir de <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/257>

Dyer, K. R., & Manning, A. J. (1999). Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. *Journal of sea research*, 41(1-2), 87-95. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(98\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(98)00036-7)

Eisma, D. (1986). Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3), 183-199. [http://dx.doi.org/10.1016/0077-7579\(86\)90041-4](http://dx.doi.org/10.1016/0077-7579(86)90041-4).

Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>

Frezzotti, M. L., Tecce, F., & Casagli, A. (2012). Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>

Gómez, J., (2015). "DUNE AND COASTAL EVOLUTION IN ISLA SALAMANCA NATIONAL PARK, COLOMBIA" (Tesis de Maestría). Wilfrid Laurier University, Waterloo, Canadá. Recuperado de: <https://scholars.wlu.ca/etd/1714>

Hernández Bustos, H. I. (2017). *Variabilidad de la estratificación y mezcla en la desembocadura del Delta del río Magdalena* (Tesis de maestría). Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Recuperado de: Repositorio Institucional Universidad del Norte. <http://manglar.uninorte.edu.co/>

Higgins, A., Restrepo, J. C., Otero, L. J., Ortiz, J. C., & Conde, M. (2017). Distribución vertical de sedimentos en suspensión en la zona de desembocadura del Río Magdalena,

Colombia. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 724-736.
<http://dx.doi.org/10.3856/vol45-issue4-fulltext-9>

Klingebiel, A., & Vernet, G. (1979). Estudio batimétrico y sedimentológico en la plataforma continental entre Cartagena y la desembocadura del río Magdalena (Colombia). *Boletín Científico CIOH*, (2), 55-70. https://doi.org/10.26640/01200542.2.55_70

Krumbein, W. C., & Pettijohn, F. J. (1938). *Manual of sedimentary petrography*.

Leppard, G. G. (2019). Evaluation of electron microscope techniques for the description of aquatic colloids. In *Environmental particles* (pp. 231-289). CRC Press.

Lonin, S. A. (2002). Un modelo morfodinámico para la zona costera del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, (20), 5-17. https://doi.org/10.26640/01200542.20.5_17

Lynn, W., Thomas, J. E., & Moody, L. E. (2008). Petrographic microscope techniques for identifying soil minerals in grain mounts. *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods*, 5, 161-190. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.5.c6>.

Madrid Montes, D. A. (2017). *Cambios morfológicos históricos en los fondos del prodelta del río Magdalena, sector Bocas de Ceniza, Costa Caribe de Colombia* (Tesis pregrado). Universidad EAFIT. Recuperado de: Repositorio Institucional Universidad EAFIT. <http://hdl.handle.net/10784/12354>

Manning, A. J., Bass, S. J., & Dyer, K. R. (2006). Floc properties in the turbidity maximum of a mesotidal estuary during neap and spring tidal conditions. *Marine Geology*, 235(1-4), 193-211. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.10.014>

Miguens, F. C., de Oliveira, M. L., de Oliveira Ferreira, A., Barbosa, L. R., de Melo, E. J. T., & de Carvalho, C. E. V. (2016). Structural and elemental analysis of bottom sediments from the Paraíba do Sul River (SE, Brazil) by analytical microscopy. *Journal of South American Earth Sciences*, 66, 82-96.

Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2013). *River discharge to the coastal ocean: a global synthesis*. Cambridge University Press.

Molinares, C. E., Martínez, J. I., Fiorini, F., Escobar, J., & Jaramillo, C. (2012). Paleoenvironmental reconstruction for the lower Pliocene Arroyo Piedras section (Tubará-Colombia): Implications for the Magdalena River-paleodelta's dynamic. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 170-183. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.007>

Ortiz-Royero, J. C., & Rosales, M. (2012). Severe tornadoes on the Caribbean coast of Colombia since 2001 and their relation to local climate conditions. *Natural hazards*, 64(2), 1805-1821. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.007>

Ospino, O. (2019). Propiedades del Sedimento Suspendido en Condiciones de Flujo Estratificado no Estacionario – Desembocadura del río Magdalena. Tesis de Maestría. Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia. Recuperado de: Repositorio Institucional Universidad del Norte. <http://manglar.uninorte.edu.co/>

Otero, J., & Cano, V. (2015). Espectroscopía Raman: Fundamento y aplicaciones. 10.13140/RG.2.1.5015.5362.

Partheniades, E. (2009). *Cohesive sediments in open channels: erosion, transport, and deposition*. Butterworth-Heinemann.

Restrepo, J. C. 2014. Dinámica sedimentaria en deltas micromareales-estratificados de alta descarga: delta del río Magdalena (Colombia-Mar Caribe). Tesis doctoral en Ciencias del Mar. Universidad del Norte, Barranquilla-Colombia. Recuperado de: Repositorio Institucional Universidad del Norte. <http://manglar.uninorte.edu.co/>

Restrepo, J. C., Miranda, J., & Restrepo, J. D. (2005). El río Magdalena: contexto global, suramericano y nacional. *Los sedimentos del río Magdalena. Reflejo de la crisis ambiental*, 55-66. Medellín: Universidad EAFIT - Colciencias.

Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Bartholomae, A., Ospino, S., Ortíz, J. C., ... & Orejarena, A. (2018). Estuarine and sediment dynamics in a microtidal tropical estuary of high fluvial discharge: Magdalena River (Colombia, South America). *Marine Geology*, 398, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.12.008>

Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2004). The Pacific and Caribbean rivers of Colombia: water discharge, sediment transport and dissolved loads. In *Environmental geochemistry in tropical and subtropical environments* (pp. 169-187). Springer, Berlin, Heidelberg.

Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>

Restrepo-López, J. C., Ortiz-Royero, J. C., Otero-Díaz, L., & Ospino-Ortiz, S. R. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(153), 527-546.

Riezebos, P. A. (1979). Compositional downstream variation of opaque and translucent heavy residues in some modern Rio Magdalena sands (Colombia). *Sedimentary Geology*, 24(3-4), 197-225. DOI: 10.18257/raccefyn.209

Safak, I., Allison, M. A., & Sheremet, A. (2013). Flocc variability under changing turbulent stresses and sediment availability on a wave energetic muddy shelf. *Continental Shelf Research*, 53, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2012.11.015>.

Sahin, C., Guner, H. A. A., Ozturk, M., & Sheremet, A. (2017). Flocc size variability under strong turbulence: observations and artificial neural network modeling. *Applied Ocean Research*, 68, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.08.012>

The Hudson Institute of Mineralogy. (12 de mayo de 2020). Mindat.org. <https://www.mindat.org/>.

Thomas, L. P., Marino, B. M., Szupiany, R. N., & Gallo, M. N. (2017). Characterization of the suspended particulate matter in a stratified estuarine environment employing complementary techniques. *Continental Shelf Research*, 148, 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.08.024>

Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25(1), 655-744. <https://doi.org/10.1130/GSAB-25-655>

University of Arizona. 12 de marzo de 2020. RUFF Project. <https://ruff.info/>

Van Leussen, W., 1988. Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs a review. In: *Physical Processes in Estuaries*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 347-403. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73691-9_19. Berlin, Heidelberg.

Wang, Y. P., Voulgaris, G., Li, Y., Yang, Y., Gao, J., Chen, J., & Gao, S. (2013). Sediment resuspension, flocculation, and settling in a macrotidal estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(10), 5591-5608. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20340>

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392. <https://doi.org/10.1086/622910>

Winterwerp, J. C. (2002). "Scaling parameters for high-concentrated mud suspension in tidal flow." *Fine sediment dynamics in the marine environment*, J. C. Winterwerp, and C. Kranenburg, eds., 5, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 171-186. [https://doi.org/10.1016/S1568-2692\(02\)80015-8](https://doi.org/10.1016/S1568-2692(02)80015-8)

Winterwerp, J. C. (2011). Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening. *Ocean Dynamics*, 61(2-3), 203-215. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0332-0>

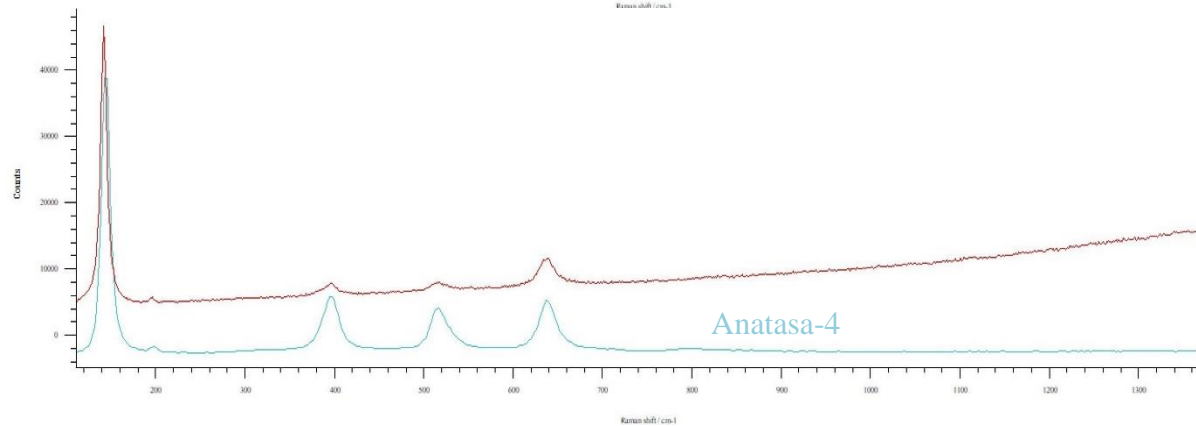
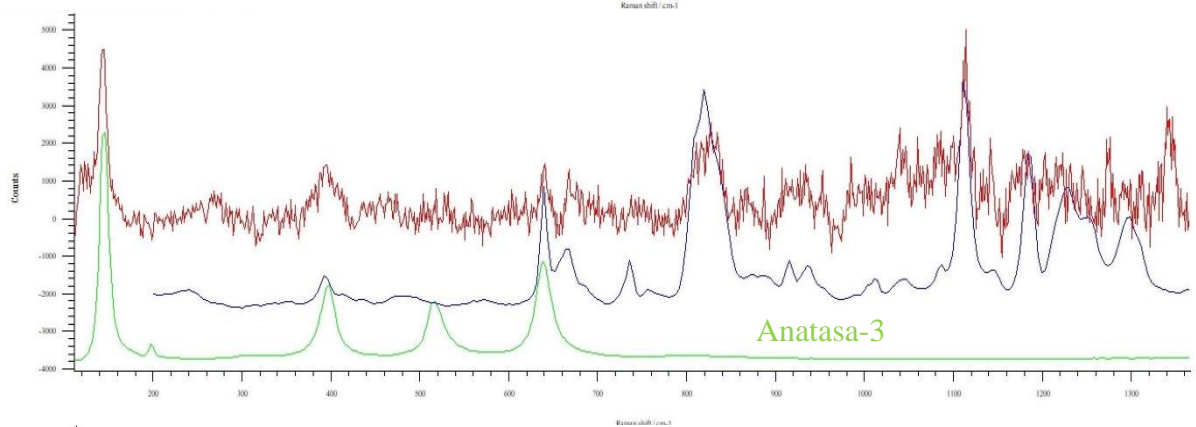
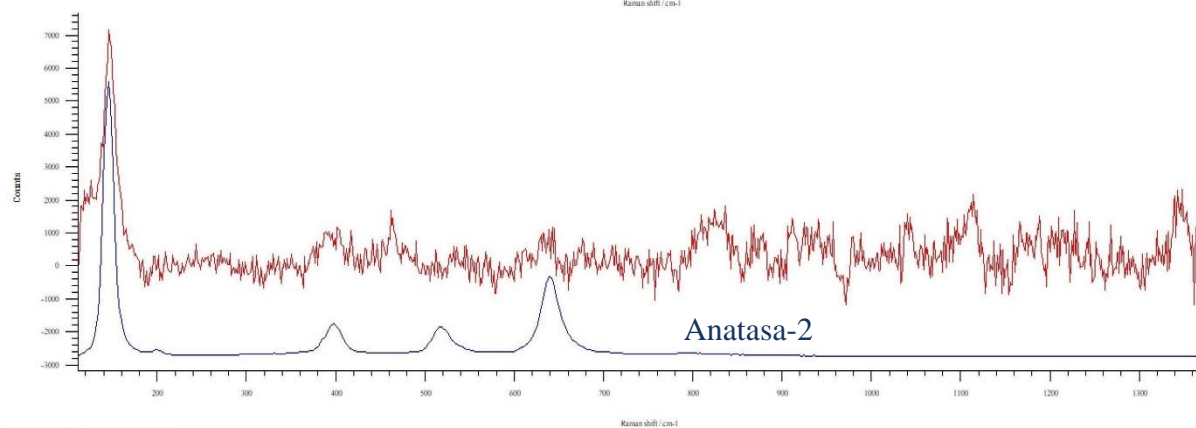
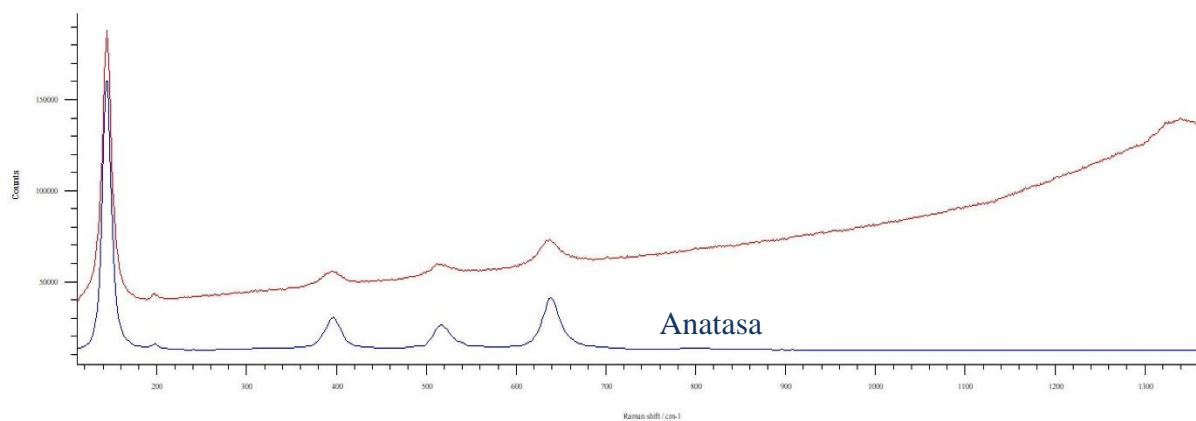
Woodruff, J. D., Geyer, W. R., Sommerfield, C. K., & Driscoll, N. W. (2001). Seasonal variation of sediment deposition in the Hudson River estuary. *Marine Geology*, 179(1-2), 105-119. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00182-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00182-7)

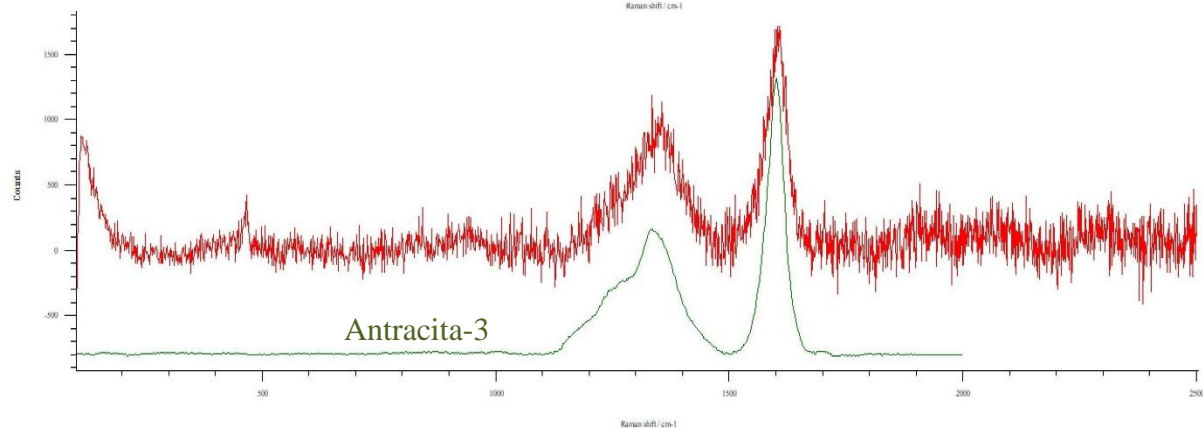
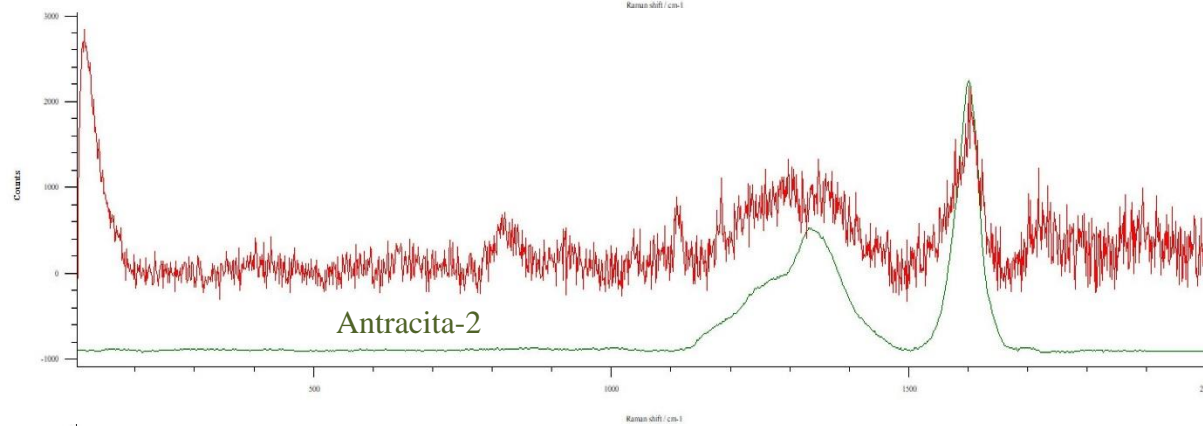
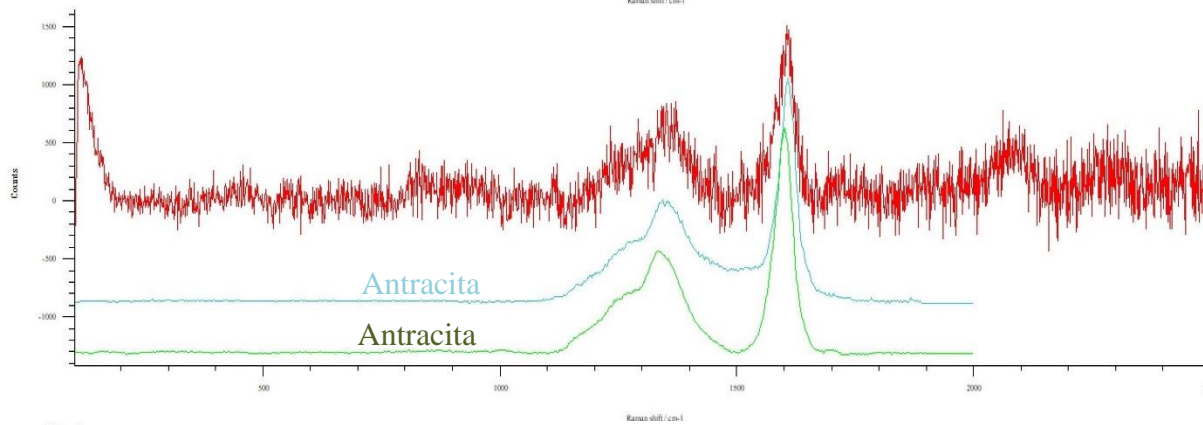
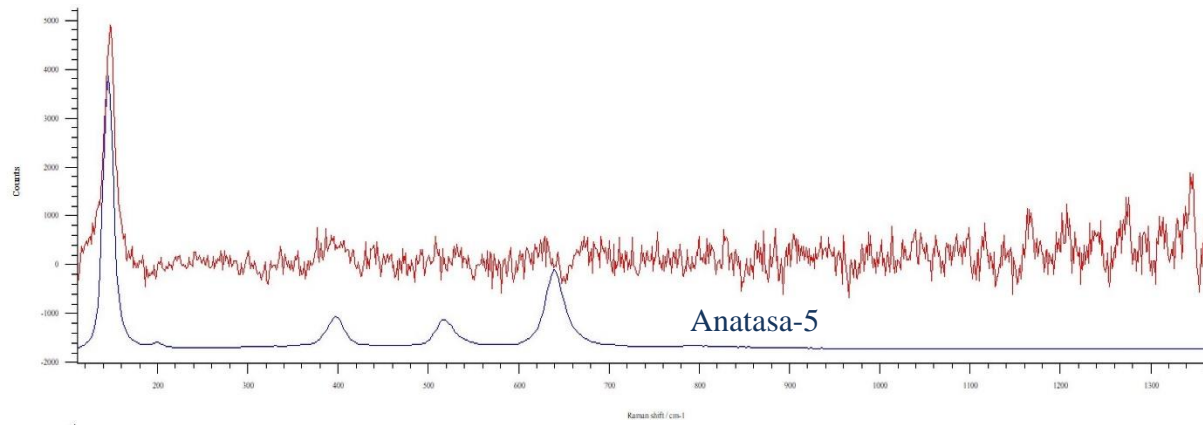
Apéndice A. Distribución de tamaños del LISST-200X

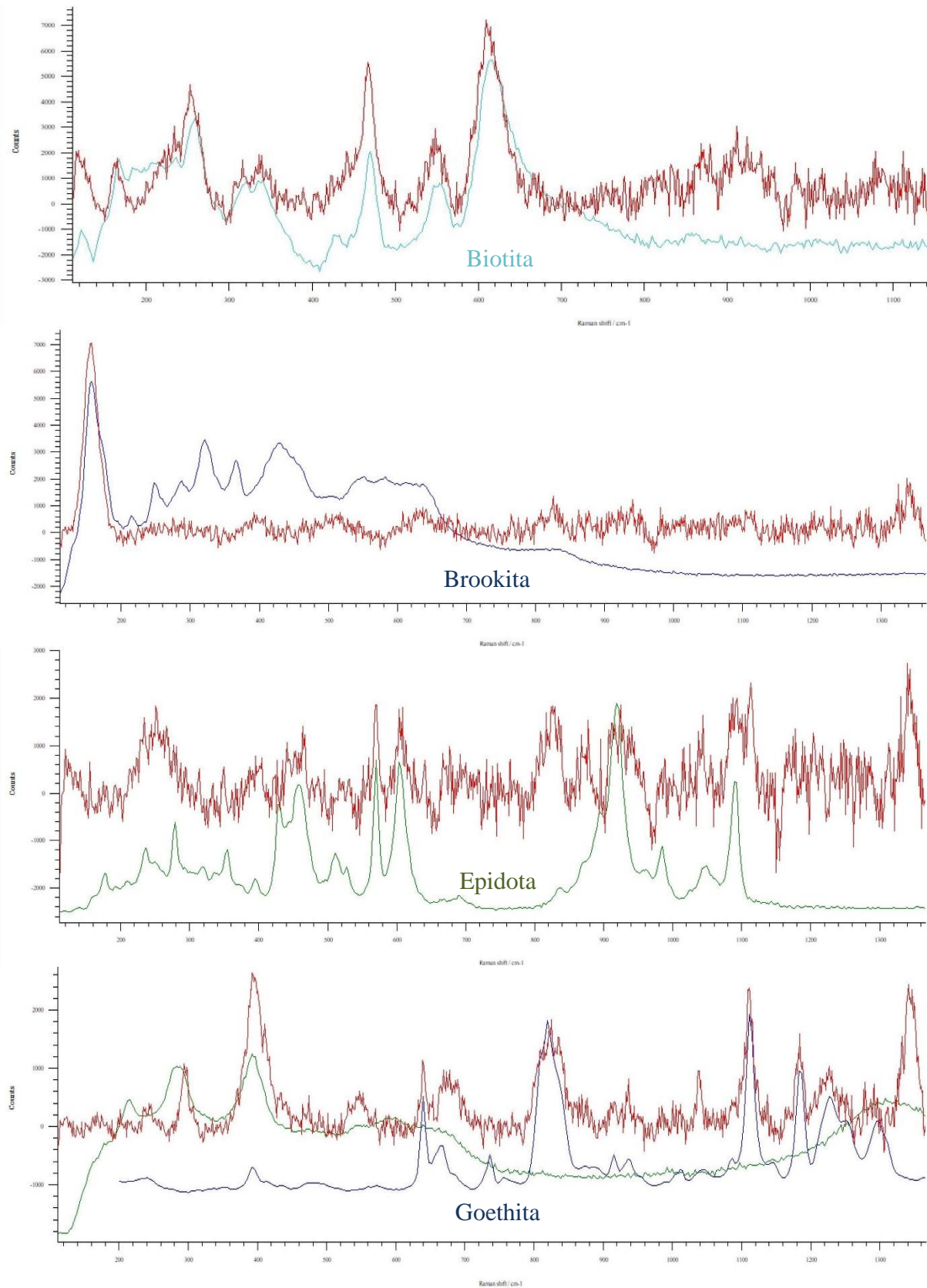
Distribución de tamaños de partículas medidos por el LISST-200X. Tomado de:
Sequoia Scientific, 2018.

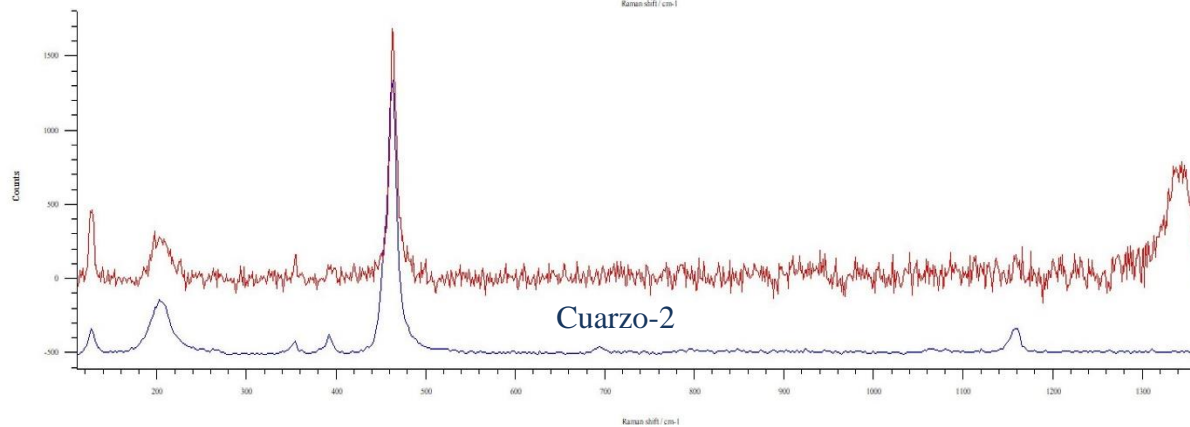
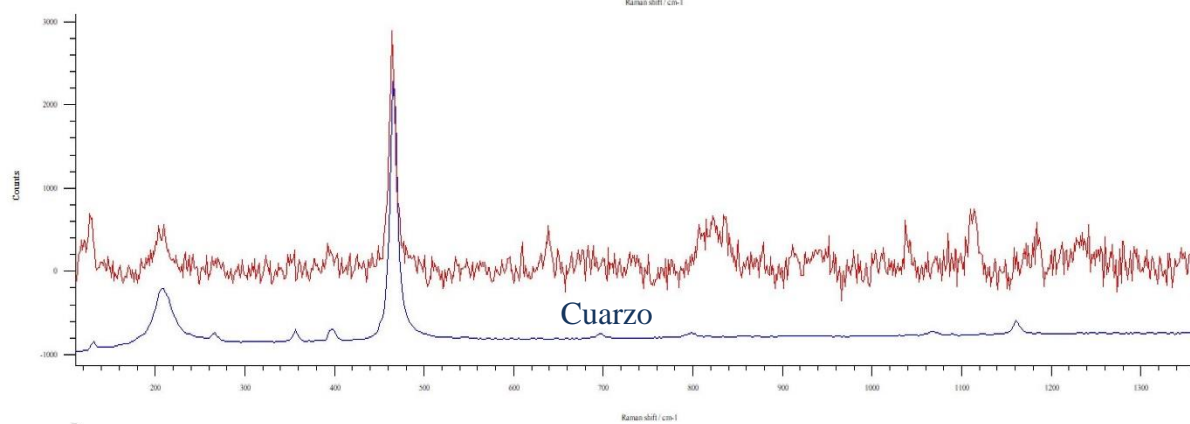
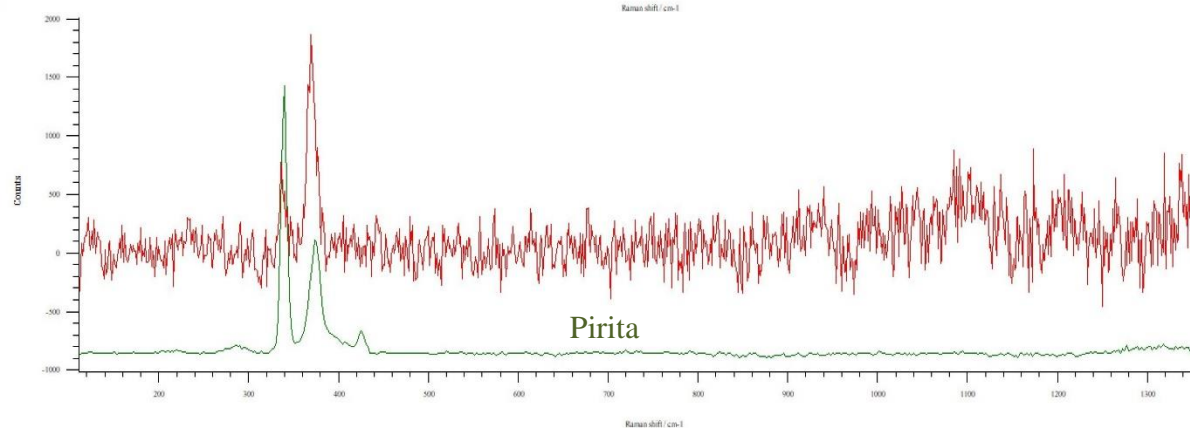
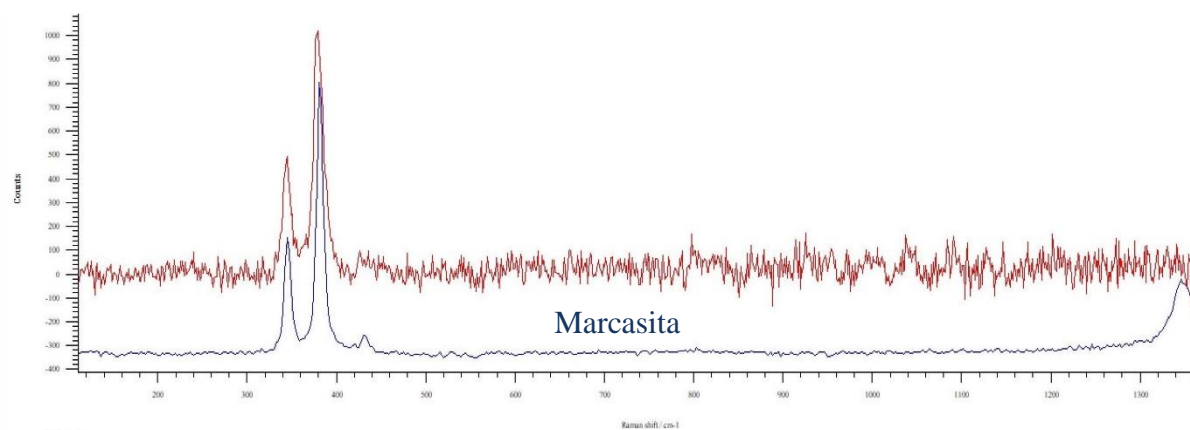
Size Bin #	Lower limit (μm)	Mid-point (μm)	Upper limit (μm)	Size Bin #	Lower limit (μm)	Mid-point (μm)	Upper limit (μm)
1	1.00	1.21	1.48	19	24.6	26.7	29.1
2	1.48	1.60	1.74	20	29.1	31.6	34.3
3	1.74	1.89	2.05	21	34.3	37.2	40.5
4	2.05	2.23	2.42	22	40.5	43.9	47.7
5	2.42	2.63	2.86	23	47.7	51.9	56.3
6	2.86	3.11	3.38	24	56.3	61.2	66.5
7	3.38	3.67	3.98	25	66.5	72.2	78.4
8	3.98	4.33	4.70	26	78.4	85.2	92.6
9	4.70	5.11	5.55	27	92.6	101	109
10	5.55	6.03	6.55	28	109	119	129
11	6.55	7.11	7.72	29	129	140	152
12	7.72	8.39	9.12	30	152	165	180
13	9.12	9.90	10.8	31	180	195	212
14	10.8	11.7	12.7	32	212	230	250
15	12.7	13.8	15.0	33	250	273	297
16	15.0	16.3	17.7	34	297	324	354
17	17.7	19.2	20.9	35	354	386	420
18	20.9	22.7	24.6	36	420	459	500

Apéndice B. Espectros de Raman

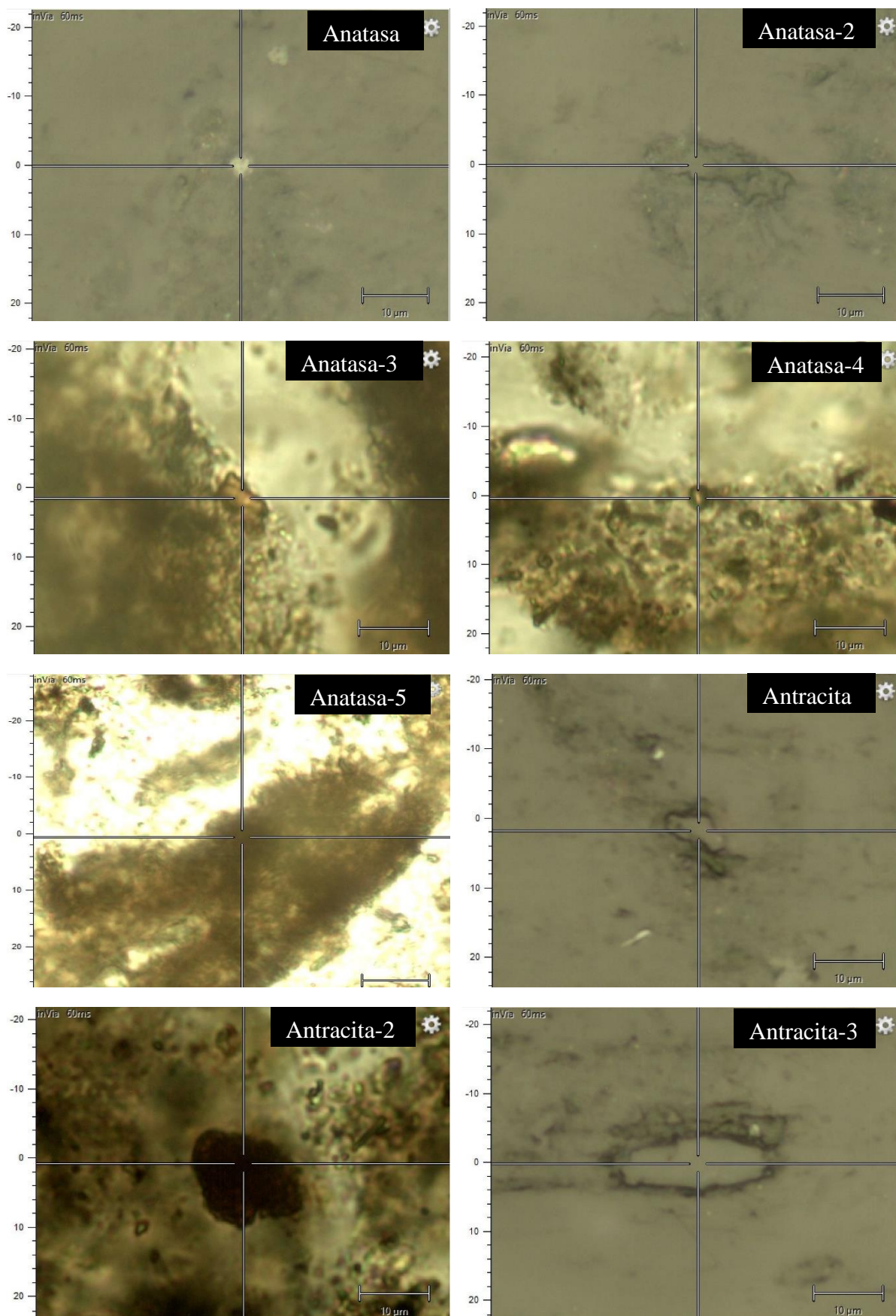


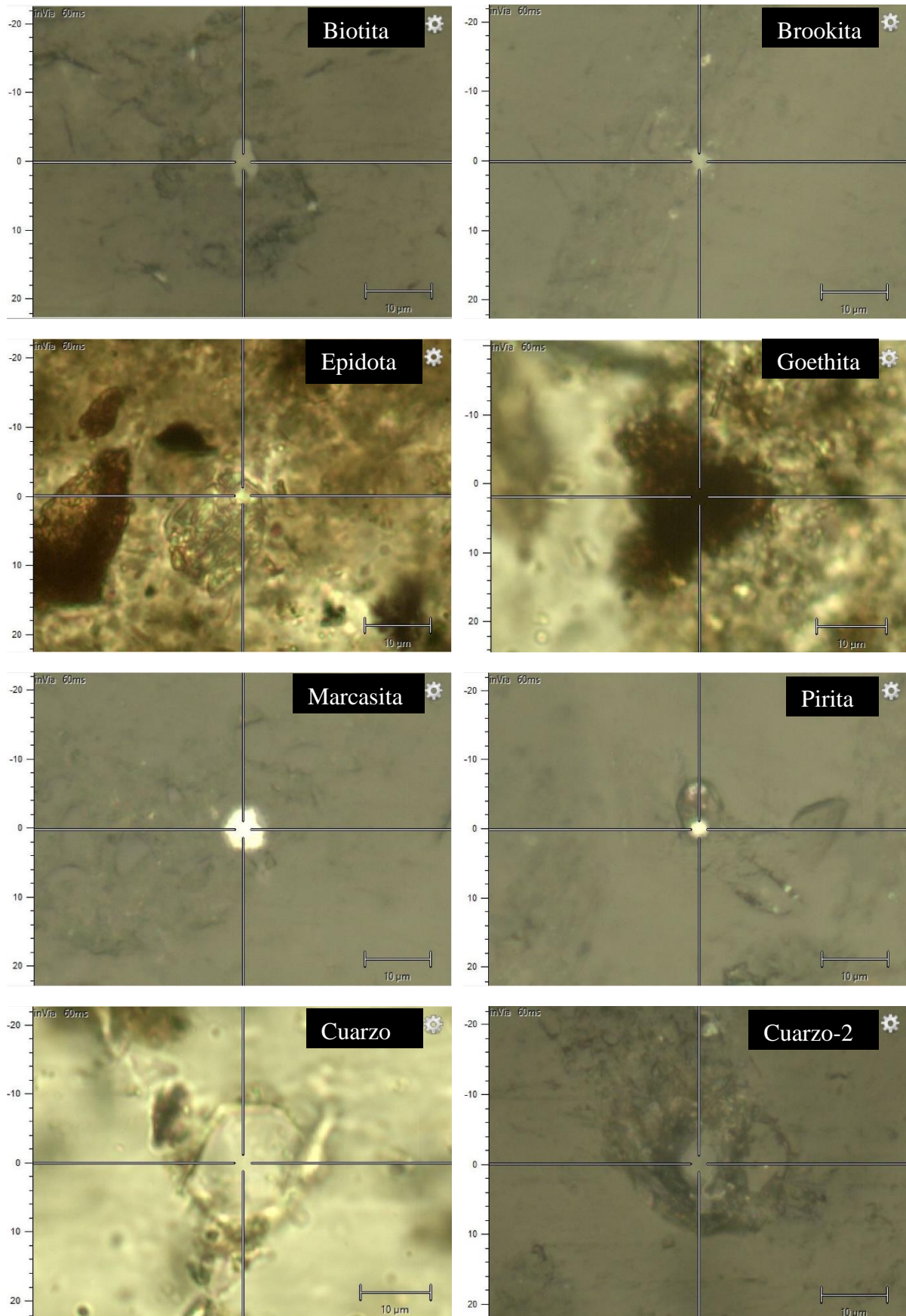






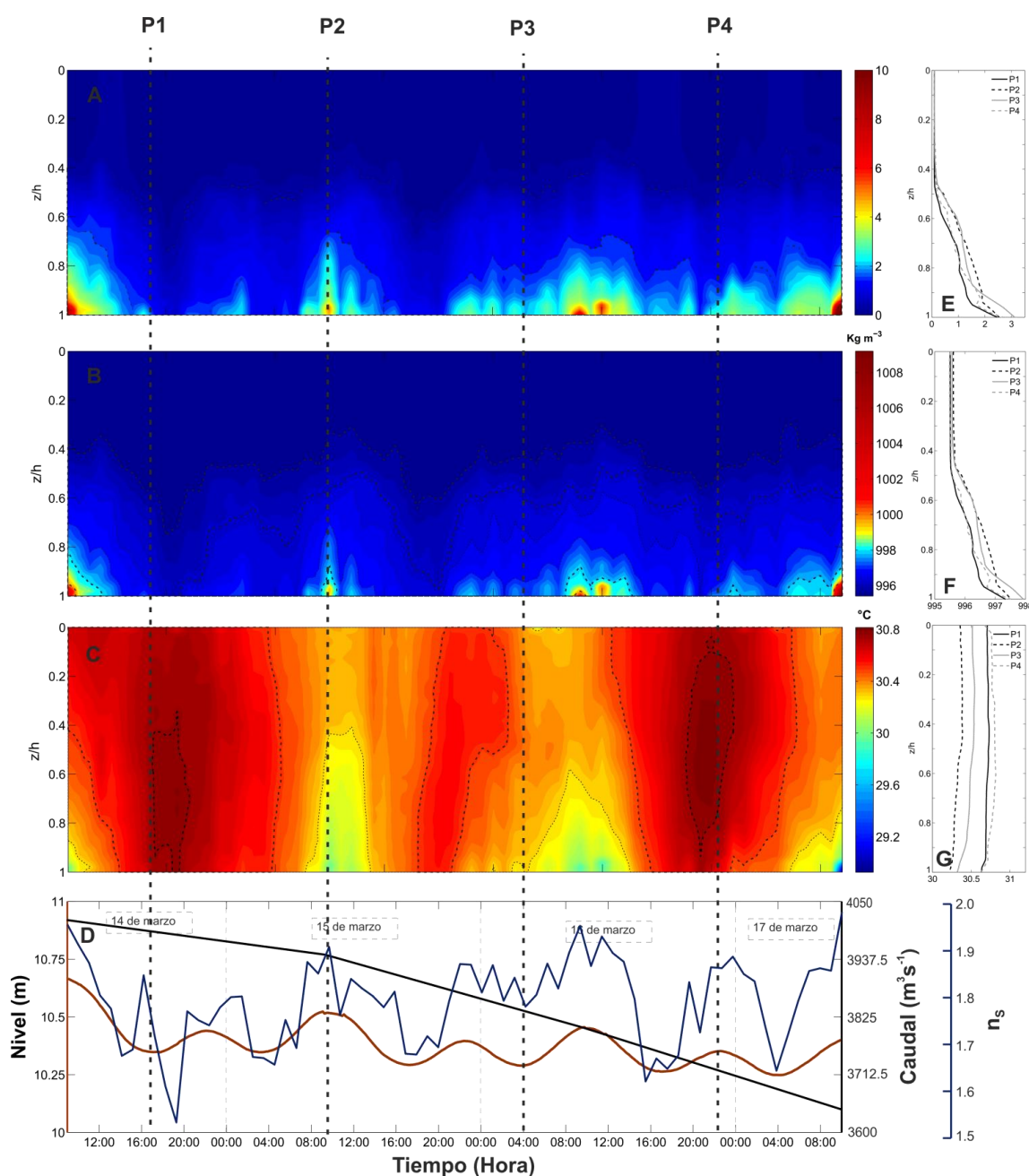
Apéndice C. Fotografías de minerales, a través de espectroscopía de Raman.





Apéndice D. Parámetros estuarinos

Los parámetros estuarinos se representan en gráficos de contorno: A) Contorno de Salinidad, B) Contorno de Densidad; C) Contorno de Temperatura; D) Gráfico de forzadores: Marea (línea naranja), Caudal (línea negra) y Parámetro de estratificación (línea azul); E) Perfiles de Salinidad en los puntos señalados (P1, P2, P3 y P4); F) Perfiles de Densidad en los puntos señalados y, G) Perfiles de Temperatura en los puntos señalados. Tomado de: Ospino (2019)



Apéndice E. % Materia orgánica

Se muestran los porcentajes de MO estimados en la capa superficial, capa media y fondo de la columna de agua. La línea negra indica las oscilaciones de la marea durante el tiempo de duración de la campaña de campo. Tomado de: Ospino (2019)

